

TUGAS AKHIR - TM 141585

**SIMULASI NUMERIK PENGARUH KECEPATAN
INLET DAN POSISI KETINGGIAN *OUTLET*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PADA
RUANG SERVER DENGAN *TOP FLOW INLET***

TRI YUDY
NRP. 2115 105 016

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TM 141585

**SIMULASI NUMERIK PENGARUH KECEPATAN
INLET DAN POSISI KETINGGIAN *OUTLET*
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PADA
RUANG SERVER DENGAN *TOP FLOW INLET***

TRI YUDY
NRP. 2112 100 088

Pembimbing:
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TM 141585

***NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF
INLET VELOCITY AND POSITION OF THE
OUTLET HEIGHTS ON FLOW
CHARACTERISTICS AND CONVECTION HEAT
TRANSFER IN THE SERVER ROOM WITH TOP
FLOW INLET***

TRI YUDY
NRP. 2112 100 088

Supervisor
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2017

**SIMULASI NUMERIK PENGARUH KECEPATAN *INLET*
DAN POSISI KETINGGIAN *OUTLET* TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
KONVEKSI PADA RUANG SERVER DENGAN *TOP INLET*
*FLOW***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

TRI YUDY

NRP. 2115 105 016

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng (Pembimbing)
NIP. 1965055051990034005
2. Dr. Ir. Budi Utomo K.W., ME (Penguji I)
NIP. 195312191981031001
3. Ary Bachtiar KP, ST, MT, PhD (Penguji II)
NIP. 197105241997021001
4. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT (Penguji III)
NIP. 197301161997021001

SURABAYA

JULI, 2017

SIMULASI NUMERIK PENGARUH KECEPATAN INLET DAN POSISI KETINGGIAN OUTLET TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PADA RUANG SERVER DENGAN *TOP FLOW INLET*

Nama Mahasiswa : Tri Yudy
NRP : 2115 105 016
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

Abstrak

Ruang server adalah suatu fasilitas yang digunakan untuk menempatkan sistem komputer dan komponen-komponen terkaitnya, seperti sistem telekomunikasi dan penyimpanan data. Sebuah ruang server harus memiliki standar keamanan yang melindungi kerja perangkat-perangkat di dalamnya khususnya temperatur pada rak server. Mengacu pada Thermal Guidelines for Data Processing Environments ASHRAE dan studi literatur, temperatur rekomendasi pada ruang server adalah sekitar 18°C-27°C dan temperatur kerja yang baik pada rak server adalah di bawah 45°C. Tetapi, sebagian besar perusahaan yang memiliki ruang server, mengendalikan temperatur rak server di bawah 40°C, karena rekomendasi ASHRAE untuk temperatur rak server 45°C terlalu panas. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem distribusi pendinginan yang baik pada ruang server dan pengawasan/monitoring terhadap temperatur rak server server sehingga tidak terjadi overheating.

Untuk melakukan pengawasan/monitoring terhadap temperatur rak server, maka diperlukan adanya suatu proses simulasi, dimana akan divariasikan posisi outlet dan kecepatan inlet sehingga dapat diketahui besarnya temperatur rak server dengan tidak mengubah temperatur referensi. Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan domain pemodelan dibuat menggunakan GAMBIT 2.4.6 dan disimulasikan dengan

menggunakan ANSYS 16.2. Top flow inlet dimodelkan sebagai udara bersuhu 15°C dengan aliran uniform dan steady pada sisi inlet. Kondisi batas adalah top inlet sebagai velocity inlet, sedangkan outlet adalah outflow dan tiap rak server diberi heat flux konstan sebesar 250 W/m². Variasi yang digunakan adalah posisi ketinggian outlet 0,5m; 1m; 1,8m; 3m; dan variasi kecepatan inlet 2 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s.

Dari hasil simulasi ini didapatkan visualisasi karakteristik aliran dan perpindahan panas yang melewati rak server, yakni diantaranya distribusi temperatur dan distribusi kecepatan udara. Selain itu, diperoleh data mentah yang diolah untuk menghasilkan perbandingan antara Nusselt Number dan koefisien perpindahan panas terhadap critical rak server. Kesimpulan yang dapat diambil bahwa temperatur critical rak server berada pada rak server 2 pada ketinggian outlet 1,8 m dengan variasi kecepatan 2,5 m/s. Untuk distribusi udara paling baik adalah pada kecepatan inlet 3 m/s di berbagai variasi posisi ketinggian outlet.

Kata kunci: Ruang server, top inlet, temperatur, simulasi numerik, perpindahan panas.

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF INLET VELOCITY AND POSITION OF THE OUTLET HEIGHTS ON FLOW CHARACTERISTICS AND CONVECTION HEAT TRANSFER IN THE SERVER ROOM WITH TOP FLOW INLET

Name : Tri Yudy

NRP : 2115 105 016

Department : Mechanical Engineering FTI-ITS

Supervisor : Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng.

Abstract

Server room is a facility used to put the computer systems and related components, such as telecommunications and storage systems. A server room must have a high security standard that protects the working of devices, especially the temperature at the rack server. Referring to ASHRAE's Thermal Guidelines for Data Processing Environments and literature studies, the recommended temperature in the server room is around 18°C-27°C and the working temperature of the rack server is below 45°C. However, most companies that have server space, controlling the rack server temperature below 40°C, because ASHRAE recommendations for 45°C are too hot. Therefore, a good cooling distribution system is required in the server room and controlling / monitoring of rack server temperature.

To control / monitor the server rack temperature, it is necessary to process simulation, which will be varied the position of the outlet heights and inlet velocity so that can know the magnitude of the temperature of the rack server with no change in the reference temperature. This research will be simulated based on numerical., the domain modeling is made using GAMBIT 2.4.6 and will be simulated using ANSYS 16.2. Top flow inlet is modelled as 15°C of an air, uniform and steady flow at the inlet. The boundary condition is the Top flow inlet as velocity inlet, the outlet is outflow and each rack server is given a constant heat flux of 250

W / m². The variation used is the position of the outlet height of 0,5m; 1m; 1,8m; 3m;; and variation of inlet velocity of 2 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s.

The simulation results obtained from the visualization of flow characteristics and heat transfer that pass through the rack server, that is temperature distribution and air velocity distribution. In addition, the acquired raw data is processed to produce a comparison between Nusselt Number and the heat transfer coefficient of the critical rack server. The conclusion can be drawn that the critical temperature is on the rack server number 2 at a height of outlet is 1,8m with inlet velocity of 2,5 m/s. For the best air distribution is the inlet velocity of 3 m/s in various variations of outlet height position.

Keywords: Server room, top inlet, temperature, numerical simulation, heat transfer.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Dalam penyelesaian laporan tugas akhir, penulis mendapatkan bantuan moril maupun materi, bimbingan serta masukan–masukan yang sangat membantu. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng, selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang selalu memberikan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis dan selalu memotivasi penulis.
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME, selaku dosen penguji serta yang selalu memberikan bimbingan tentang tugas akhir penulis dan juga sebagai dosen yang telah mengajarkan mata kuliah perpindahan panas, terima kasih atas ilmu dan saran-saran yang telah diberikan.
3. Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT, selaku dosen penguji tugas akhir penulis serta yang selalu memberikan bimbingan tentang tugas akhir penulis, terima kasih atas ilmu dan saran-saran yang telah diberikan.
4. Ary Bachtiar KP., ST. MT. Ph.D, selaku dosen penguji serta yang selalu memberikan bimbingan tentang tugas akhir penulis dan juga sebagai dosen yang telah mengajarkan mata kuliah teknik pendingin, terima kasih atas ilmu dan saran-saran yang telah diberikan.
5. Orang tua dan keluarga tercinta yang selalu memberikan nasehat kepada penulis dan selalu memberi dukungan dan mendoakan penulis.
6. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.
7. Semua teman Lintas Jalur yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan dengan senang hati penulis siap menerima

kritik dan saran yang tentunya bersifat mendorong untuk kemajuan di kemudian hari. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK.....iii

ABSTRACT.....v

KATA PENGANTARvii

DAFTAR ISI.....ix

DAFTAR GAMBAR.....xi

DAFTAR TABEL.....xiii

BAB 1 PENDAHULUAN.....1

1.1. Latar Belakang1

1.2. Rumusan Masalah.....2

1.3. Batasan Masalah3

1.4. Tujuan penelitian.....4

1.5. Manfaat Penelitian4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....5

2.1. Penelitian Pendahuluan5

2.1.1. *Three Dimensional Analysis For Hospital Operating Room Thermal Comfort And Contaminant Removal...*5

2.1.2. Simulasi Numerik Distribusi Temperatur Dan Kecepatan Udara Pada Ruang Unit Produksi Pt. Pertamina (Persero) – *Production Unit* Gresik Lubricant9

2.2. *Server Room*.....14

2.2.1. *Computer Room Air Conditioning (CRAC)*15

2.2.2. Rak Server16

2.3. Perpindahan Panas17

2.3.1. Konduksi17

2.3.2. Konveksi.....18

2.3.3. Radiasi.....19

2.4. Lapis Batas Termal (*Thermal Boundary Layer*)20

2.5. Aliran Laminer dan Turbulen.....21

2.6. Pemodelan CFD (*Computational Fluid Dynamic*).....28

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....33

3.1. Tahapan Penelitian	33
3.2. Pengumpulan Data	34
3.3. Pemodelan dan Simulasi	35
3.3.1. Tahap <i>Pre-Processing</i>	35
3.3.2. Tahap <i>Processing</i>	37
3.3.3. Tahap <i>Post-Processing</i>	39
3.4. Flowchart Penelitian	39
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	41
4.1. Analisa Visualisasi Dengan Variasi Posisi Ketinggian <i>Outlet</i>	44
4.1.1. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 1	45
4.1.2. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 2	50
4.2. Analisa Visualisasi Dengan Variasi Kecepatan	55
4.2.1. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 1	55
4.2.2. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 2	57
4.3. Analisa Grafik Temperatur Belakang Rak Server Dengan Variasi Posisi Ketinggian <i>Outlet</i>	59
4.4. Karakteristik Perpindahan Panas	63
4.4.1. Contoh Perhitungan	63
4.4.2. Analisa Perpindahan Panas	65
BAB V PENUTUP	67
5.1. Kesimpulan	67
5.2. Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Model ruang server	2
Gambar 2.1 Model ruang operasi	6
Gambar 2.2 Distribusi kecepatan udara pada simulasi 3	7
Gambar 2.3 Distribusi temperatur udara pada simulasi 3	8
Gambar 2.4 Hasil domain tiga dimensi bangunan.....	10
Gambar 2.5 Visualisasi kontur temperatur udara bidang (a) $x/l = -1,5$ dan (b) $x/l = 0,4$ dengan kecepatan udara $2,5 \text{ m/s}$	11
Gambar 2.6 Pengaruh Variasi kecepatan udara pendingin terhadap distribusi temperatur udara bidang zy pada ketinggian $1,2 \text{ m}$	12
Gambar 2.7 Analisa perpindahan panas <i>nusselt number</i> dan koefisien konveksi	13
Gambar 2.8 <i>Upflow ducting configuration</i>	15
Gambar 2.9 Tipe pendinginan dengan <i>upflow</i>	16
Gambar 2.10 Dell <i>rackmount servers</i>	17
Gambar 2.11 Perpindahan panas secara konveksi	19
Gambar 2.12 <i>Thermal boundary layer</i>	20
Gambar 2.13 Profil-profil kecepatan untuk lapisan batas melewati pelat datar	21
Gambar 3.1 Model ruang server	34
Gambar 3.2 Hasil pembuatan geometri ruang server	36
Gambar 3.3 Hasil meshing ruang server	36
Gambar 3.4 <i>Boundary condition</i>	37
Gambar 3.5 <i>Flowchart</i> Tahapan Penelitian.....	40
Gambar 4.1 Hasil domain tiga dimensi ruang server	41
Gambar 4.2 Tampak atas ruang server	42
Gambar 4.3 Isometrik ruang server dan potongan <i>iso-surface</i>	43
Gambar 4.4 Pathline Aliran udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$	44
Gambar 4.5 Kontur kecepatan udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$	46
Gambar 4.6 Kontur kecepatan udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$	47
Gambar 4.7 Vektor kecepatan udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$...	48
Gambar 4.8 Kontur temperatur udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$.	50

Gambar 4.9 Kontur kecepatan udara pada server 2 ; $v = 2$ m/s...	51
Gambar 4.10 Vektor kecepatan udara pada server 2 ; $v = 2$ m/s..	52
Gambar 4.11 Kontur temperatur di sekitar server 2 ; $v = 2$ m/s ..	54
Gambar 4.12 Kontur kecepatan udara pada server 1; posisi ketinggian <i>outlet</i> 0,5 m.....	55
Gambar 4.13 Kontur temperatur udara pada server 1; posisi ketinggian <i>outlet</i> 0,5m.....	56
Gambar 4.14 Kontur kecepatan udara pada server 2; posisi ketinggian <i>outlet</i> 0,5 m (a) $v = 2$ m/s (b) $v = 2.5$ m/s (c) $v = 3$ m/s	57
Gambar 4.15 Kontur temperatur udara pada server 2; posisi ketinggian <i>outlet</i> 0,5m (a) $v = 2$ m/s (b) $v = 2.5$ m/s (c) $v = 3$ m/s	58
Gambar 4.16 Permukaan belakang rak server	60
Gambar 4.17 Grafik temperatur belakang rak server	61
Gambar 4.18 <i>Detail</i> rak server 2	63
Gambar 4.19 Perbandingan <i>Nusselt Number</i> pada posisi ketinggian <i>outlet</i> 1,8 m; $V = 2,5$ m/s.....	65
Gambar 4.20 Perbandingan koefisien konveksi pada posisi ketinggian <i>outlet</i> 1,8 m; $V = 2,5$ m/s.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rentang nilai Bilangan <i>Prandtl</i> untuk fluida.....	23
Tabel 2.2 <i>Constants of equation 2.20 for noncircular cylinders in cross flow of a gas</i>	27
Tabel 3.1 <i>Boundary condition</i>	38
Tabel 4.1 Matriks perbandingan posisi ketinggian <i>outlet</i> dan variasi kecepatan <i>inlet</i> terhadap rak server	62

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

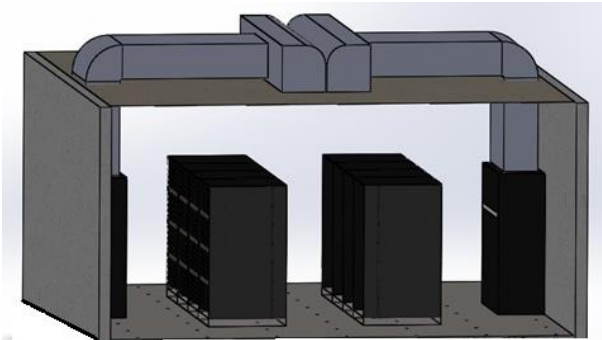
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ruang server adalah suatu fasilitas yang digunakan untuk menempatkan sistem komputer dan komponen-komponen terkaitnya, seperti sistem telekomunikasi dan penyimpanan data. Pada server terdapat beberapa rak yang tersusun secara vertikal, yang memerlukan pengawasan ketat agar seluruh sistem dan perangkat/komponen dapat terus berjalan dari hari ke hari tanpa berhenti. Sebuah ruang server harus memiliki standar keamanan yang melindungi kerja perangkat-perangkat di dalamnya dari mulai suhu udara, kelembaban, kebakaran dan akses masuk dari orang-orang yang tidak berkepentingan.

Ruang server sangat rentan terhadap temperatur yang tinggi. Di dalam rak server terdapat perangkat/komponen, salah satunya *motherboard* yang di dalamnya terdapat *chip/processor* yang mengeluarkan kalor sehingga membuat temperatur rak server meningkat. Meningkatnya temperatur tersebut dapat menyebabkan *overheat* dan dapat menyebabkan sistem terganggu. Oleh sebab itu, penggunaan sensor suhu yang diletakkan di rak server menjadi sebuah solusi untuk mengendalikan suhu. Selain memperhatikan panas pada server, yang perlu diperhatikan adalah suhu ruangan. Mengacu pada *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* ASHRAE dan studi literatur, temperatur rekomendasi pada ruang server adalah sekitar 18°C -27°C dan temperatur kerja yang baik pada rak server adalah di bawah 45°C. Tetapi, sebagian besar perusahaan yang memiliki ruang server, mengendalikan temperatur rak server di bawah 40°C, karena rekomendasi ASHRAE untuk temperatur rak server 45°C terlalu panas. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem distribusi pendinginan yang baik pada ruang server dan pengawasan/*monitoring* terhadap temperatur rak server server sehingga tidak terjadi *overheat*.

Untuk mendapatkan sistem distribusi pendinginan yang baik dan dapat melakukan pengawasan/*monitoring* terhadap temperatur rak server, maka diperlukan adanya suatu proses simulasi, dimana akan divariasikan posisi *outlet* dan kecepatan *inlet* sehingga dapat diketahui besarnya temperatur rak server dengan tidak mengubah temperatur referensi. Selain itu, dari simulasi juga akan didapatkan karakteristik aliran yang akan membantu dalam menganalisa perpindahan panas yang terjadi pada *critical* rak server.



Gambar 1.1 Model ruang server

Dapat dilihat pada Gambar 1.1 tampak gambar dari model ruang server. Terdapat 2 *line* server yang dimana tiap *line* terdiri dari 4 server. Tiap server tersusun dari 4 rak server dimana yang berisikan perangkat server, seperti *motherboard*, *chip/processor* yang memiliki *heat flux* konstan.

1.2. Rumusan Masalah

Dengan adanya kondisi di atas, maka pada tugas akhir kali ini akan dilakukan sebuah proses simulasi pada ruang server dengan *top flow inlet* untuk mengetahui fenomena aliran serta perpindahan panas yang terjadi pada daerah server. Dengan adanya proses simulasi ini, bagaimana distribusi temperatur dan distribusi kecepatan akibat konveksi pada server. Bagaimana perpindahan panas yang terjadi pada *critical* rak server. Variasi

yang digunakan yaitu berupa variasi kecepatan *inlet* dan posisi ketinggian *outlet* pada ruang server.

1.3. Batasan Masalah

Untuk mempermudah dalam penyusunan penelitian ini maka diperlukan adanya batasan masalah dan asumsi yang kiranya berhubungan dengan penelitian ini, batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Analisa yang dilakukan pada ruang dengan ukuran 6,8 m x 6 m x 3 m dengan temperatur lingkungan 27°C.
2. Ukuran server 0,8 m x 1 m x 1,8 m dengan jumlah server adalah 8 buah dan pada satu server memiliki 4 rak server dengan ukuran 0,8 m x 1 m x 0,3 m. [2]
3. Setiap rak server memiliki *heat flux* sebesar 250 W/m². [3]
4. Variasi ketinggian posisi *outlet* 0,5 m, 1 m, 1,8 m dan 3 m (plafon) dengan dimensi *outlet* 1,2 m x 0,4 m. [2]
5. Terdapat simplifikasi diffuser *inlet* pada simulasi dengan 16 lubang *inlet* sepanjang server dengan dimensi inlet 0,2 m x 0,2 m.
6. Fluida yang digunakan adalah udara sebagai gas ideal dengan temperatur referensi 15°C pada sisi inlet. [1]
7. Kondisi aliran diasumsikan telah *steady flow* dan *incompressible* pada sisi *inlet* dengan nilai variasi kecepatan *inlet* 2 m/s, 2,5 m/s dan 3 m/s.
8. Pemodelan ruang server menggunakan *outflow*, dimana aliran udara dingin berbelok melewati server tanpa menggunakan *fan* dalam kondisi nyata.
9. Perpindahan panas yang diamati satu dimensi yang terjadi secara konveksi, dengan mengabaikan perpindahan panas secara konduksi dan radiasi pada server.
10. Dilakukan penyederhanaan skema ruangan dalam proses pembuatan geometri dan *meshing*. Domain pemodelan dibuat menggunakan Gambit 2.4.6 dan akan disimulasikan menggunakan ANSYS 16.2.

1.4. Tujuan penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran serta perpindahan panas yang terjadi pada server dengan *top flow inlet*. Dari simulasi dengan variasi kecepatan *inlet* dan posisi ketinggian *outlet*, akan diketahui distribusi kecepatan dan distribusi temperatur pada rak server, sehingga akan ditemukan posisi rak server yang memiliki temperatur *critical*, di atas 40°C. Pengaruh fenomena aliran dan distribusi temperatur pada *critical* rak server yang didapatkan, nantinya akan dianalisa terhadap kualitas perpindahan panasnya secara teori perpindahan panas konveksi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan dan ilmu pengetahuan mahasiswa dalam hal perpindahan panas khususnya perpindahan panas secara konveksi.
2. Menambah pengetahuan tentang cara menyelesaikan masalah perpindahan panas pada kondisi nyata dengan menggunakan sistem simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Pendahuluan

2.1.1. *Three Dimensional Analysis For Hospital Operating Room Thermal Comfort And Contaminant Removal*

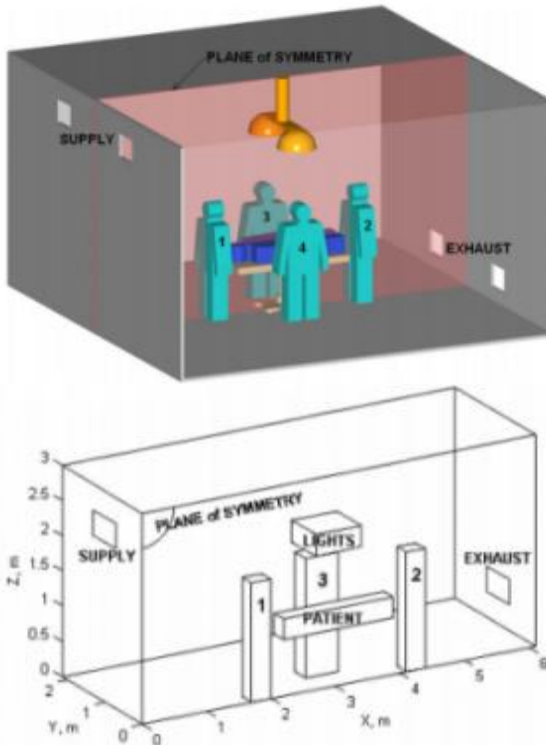
Pada tahun 2008, Son H. Ho, Luis Rosario, dan Muhammad M. Rahman dari melakukan penelitian dengan menggunakan pemodelan CFD yang bertujuan untuk mempelajari kenyamanan termal dan persebaran kontaminan dalam ruang operasi rumah sakit.

Dimensi ruang operasi 6,1 m x 4,3 m x 3,0 m. Semua sisi *supply* dan pembuangan (*exhaust*) memiliki ukuran yang sama sebesar 0,61 m x 0,36 m. Pemodelan bidang adalah simetri untuk geometri ruangan dan subyek yang ada di ruangan serta kondisi fisik yang berlaku dan kondisi batas. Karena simetri, hanya setengah ruangan yang dimodelkan sebagai kotak tiga dimensi dengan ukuran 6,1 m x 2,15 m x 3,0 m yang memiliki enam daerah batas yaitu bidang simetri, lantai, langit-langit, dan tiga dinding (kiri, kanan, dan dinding samping). Pada sistem koordinat x-y-z berimpit pada model dengan letak asal di pojok kiri bawah pada bidang simetri. Pasien berbaring dalam setengah dimodelkan sebagai sebuah kotak persegi panjang horizontal dengan ukuran (1,7 m x 0,25 m x 0,3 m) di tengah-tengah ruangan. Anggota staff bedah dimodelkan oleh kotak persegi panjang vertical yang berdiri di kedua ujung (anggota staff 1 dan 2, keduanya dalam setengah, dengan ukuran 0,3 m x 0,25 m x 1,7 m) dan di sisi pasien (anggota staff 2, secara penuh dengan ukuran 0,5 m x 0,3 m x 1,7 m). Lampu bedah juga dimodelkan sebagai kotak persegi panjang dengan dimensi 0,7 m x 0,65 m x 0,3 m di atas pasien, yang permukaan bawahnya menghadap pasien didefinisikan sebagai permukaan lampu.

Sisi *supply* terlertak di posisi atas pada dinding kiri. Ditunjukkan oleh pusat koordinat Y_s dari bidang simetri dan $Z_s=2,45$ m dari lantai. Sisi *exhaust* ditempatkan di posisi bawah di

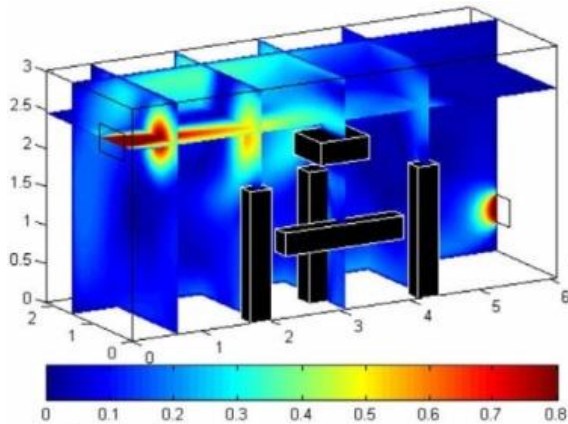
dinding kanan. Pusatnya ditunjukkan oleh koordinat Y_E dari bidang simetri dan $Z_E=0,55$ m dari lantai. Efek dari lokasi horizontal *supply* dan *exhaust* (Y_S dan Y_E) dipelajari dengan menjalankan simulasi dengan berbagai kombinasi dari koordinat.

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah *steady state* dan *incompressible flow*. Sifat fluida konstan diambil suhu referensi dari $T_{ref} = 20^\circ\text{C} = 293,15$ K adalah sebagai berikut: $q = 1,2$ kg/m³, $\mu = 1,8 \times 10^{-5}$ kg/ms, $c_p = 1004$ J/kg K, $k = 0,026$ W/mk, $\beta = 0,0034\text{K}^{-1}$, $D_{w/a} = 2,5 \times 10^{-5}$ m²/s, dan $D_{c/a} = 1,2 \times 10^{-5}$ m²/s.

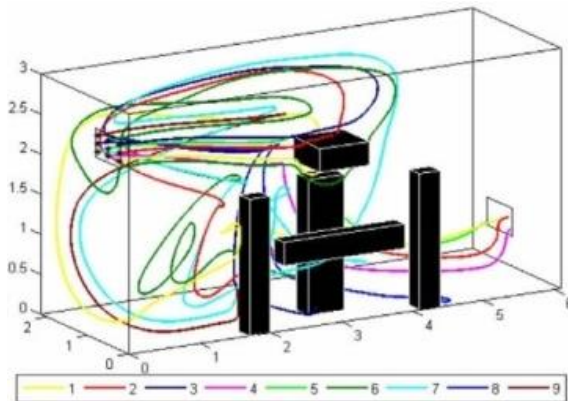


Gambar 2.1 Model ruang operasi
(Son H. Ho Et Al, 2008)

Son H. Ho dkk melakukan simulasi pada sembilan model dengan variasi posisi *inlet* dan *exhaust*. Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa model yang memberikan performa pendinginan terbaik adalah simulasi pada model 3 dengan posisi $Y_s=0,5$ m dengan temperatur antara $22,3-22,4^{\circ}\text{C}$ di semua kolom OA, BZ, dan E.



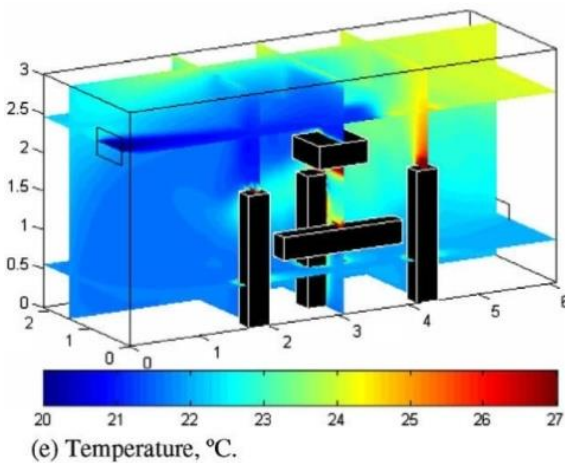
(a) Speed, m/s.



(b) Streamlines.

Gambar 2.2 Distribusi kecepatan udara pada simulasi 3 ($Y_s = 0,5$ m) (Son H.Ho Et Al, 2008)

Hasil dari simulasi tersebut aliran udara dingin masuk ruangan pada kecepatan penuh (1 m/s) melalui bukaan *supply* yang terletak pada posisi atas di dinding kiri. Rata-rata variasi kecepatan udara dalam kisaran 0,10-0,14 m/s. Pada gambar di bawah ini kecepatan udara dan *streamline* menunjukkan bahwa aliran udara *supply* bergerak secara horizontal tanpa jatuh turun ke bawah. Hal ini terjadi karena panas yang yang dilepaskan dari lampu-lampu dan tubuh penghuni mendorong terjadinya aliran konveksi alami yang memaksa udara dipanaskan secara langsung pada aliran *supply* utama dan mendukung untuk bergerak lurus. Aliran udara *supply* bergerak di sekitar bagian atas dan sisi *supply* dari kamar sebelum keluar melalui bukaan *exhaust*, sehingga pencampuran udara di wilayah ini lebih baik. Dalam simulasi ini, arus dari jauh langsung bergerak keluar ke bukaan *exhaust* tanpa alat pengarah.



Gambar 2.3 Distribusi temperatur udara pada simulasi 3
 ($Y_S = 0,5$ m Dan $Y_E = 1,5$ m)
 (Son H. Ho Et Al, 2008)

Distribusi temperatur untuk simulasi 3 dapat dilihat pada gambar di atas. Karena pencampuran aliran udara yang baik, daerah di sisi *supply* memiliki temperatur yang rendah (kurang dari

22°C). Pada bagian bawah dari ruangan yang menuju ke arah sisi *exhaust* juga memiliki temperatur yang relatif rendah karena pengaruh dari arus keluaran. Sejumlah kecil dari daerah dengan temperatur tinggi berada di sekitar lampu dan tubuh penghuni. Daerah dengan temperatur tinggi yang berada di bagian atas sisi *exhaust* dari ruangan sebenarnya memiliki suhu sedang (23-24°C).

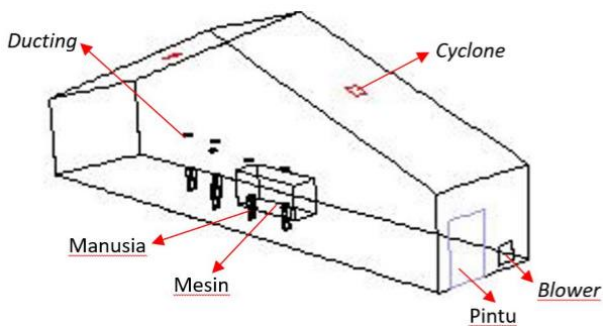
Berdasarkan hasil simulasi tersebut didapatkan bahwa pola aliran udara mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja penghilangan kontaminan dan kenyamanan termal. Untuk penilaian sederhana berarti kenyamanan termal, kecepatan udara, dan kelembaban relatif dapat diwakili oleh seluruh ruang atau hanya di atas *breathing zone* tanpa banyak perbedaan. Namun temperatur rata-rata dapat bervariasi secara signifikan dengan volume udara yang berbeda. Pengambilan temperatur rata-rata di atas *occupied zone* atau *breathing zone* dimana kondisi ini lebih dekat dengan para penghuni adalah yang terbaik. Penilaian sederhana berdasarkan rata-rata temperatur menunjukkan bahwa lokasi horizontal sisi *supply* memiliki pengaruh yang signifikan pada kenyamanan termal sedangkan sisi *exhaust* tidak. Untuk desain secara umum, dengan mempertimbangkan kondisi ruangan dalam penghilangan kontaminan dan kenyamanan termal dapat disimpulkan bahwa posisi dari sisi *supply* yang lebih dekat ke tengah ruangan memiliki performa yang semakin baik.

2.1.2. Simulasi Numerik Distribusi Temperatur Dan Kecepatan Udara Pada Ruang Unit Produksi Pt. Pertamina (Persero) – Production Unit Gresik Lubricant

Pada tahun 2016, Patricia Marunung melakukan penelitian dengan menggunakan pemodelan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang bertujuan untuk menganalisa pengkondisian udara dan perpindahan panas konveksi pada ruang unit produksi PT. PERTAMINA (Persero) – Production Unit Gresik Lubricant. Analisa dilakukan pada distribusi temperatur dan kecepatan udara pada ruangan, sistem pengkondisian udara dirancang untuk

menciptakan kondisi udara yang nyaman bagi para pekerja sehingga tercapai suasana kerja yang efektif.

Pengkondisian udara adalah proses perlakuan terhadap udara untuk mengatur temperatur, kelembaban udara, kebersihan udara dan pendistribusiannya secara seerentak guna mencapai temperatur dan kelembaban yang ideal. Analisa dilakukan pada distribusi temperatur dan kecepatan udara pada ruangan. Sistem pengkondisian udara dirancang untuk menciptakan kondisi udara yang nyaman bagi pekerja, sehingga tercapai suasana kerja yang efektif. Kondisi ruang unit produksi PT. PERTAMINA (Persero) – Production Unit Gresik Lubricant memiliki luas yang mencapai tiga ribu meter persegi. Dimana terdapat sumber panas yang mempengaruhi perpindahan panas di dalam ruangan, baik dari pekerja dan perangkat lainnya. Perangkat tersebut menghasilkan kalor yang sangat besar seperti mesin pengisi oli, oven chamber, kondensor, mesin pengangkut, serta benda-benda elektronik lainnya. Sistem pendinginan udara yang sudah diterapkan adalah dengan pemasangan 7 unit *blower* dan 24 *mechanic ventilator*.

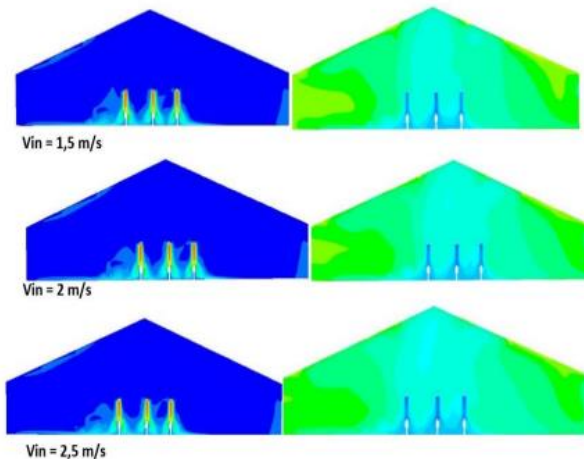


Gambar 2.4 Hasil domain tiga dimensi bangunan

Simplifikasi ruangan ini meliputi: pemilihan area simulasi, menghilangkan konveyor, menyatukan mesin-mesin yang berdekatan sebagai balok panjang, dan estimasi pekerja yang beraktivitas di sekitar mesin. Ruang sample yang ditinjau berukuran 8.000 mm x 40.000 mm x 13.400 mm. Penelitian ini

dilakukan secara numerik dengan FLUENT 6.3.26 pemodelan geometri dibuat menggunakan Gambit 2.4.6 dengan kondisi batas *inlet* dari *blower fan* dan *inlet diffuser* adalah *velocity inlet*, sedangkan *outlet* dari *ventilator* adalah *exhaust fan*, dan manusia dan mesin yang dijadikan sebagai beban pendinginan adalah *wall*, dan terdapat beban infiltrasi dari pintu yang di jadikan sebagai *pressure inlet*.

Simulasi yang dilakukan dengan variasi beban pendinginan dalam kondisi *steady*, simulasi dilakukan dengan penambahan *diffuser* pada kecepatan udara pendingin 1,5 m/s; 2 m/s; dan 2,5m/s.

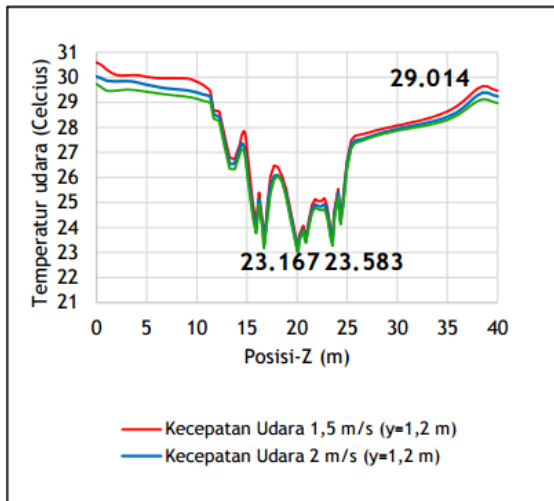


Gambar 2.5 Visualisasi kontur temperatur udara bidang (a) $x/l = -1,5$ dan (b) $x/l = 0,4$ dengan kecepatan udara 2,5 m/s

Gambar 2.5 menunjukkan distribusi kecepatan udara dan temperatur udara yang terjadi pada baris 3–5 pekerja pada tiap-tiap variasi kecepatan udara masuk. Dapat dilihat dari distribusi warna yang terjadi bahwa variasi kecepatan udara tidak memberi perbedaan yang signifikan pada kecepatan udara aliran udara di dalam ruangan. Sedangkan melalui kontur distribusi temperatur udara dapat dilihat visualisasi udara pendingin yang ditunjukkan

oleh warna biru. Semakin tinggi kecepatan udara masuk, temperatur udara ruangan semakin dingin. Terlihat melalui gambar, udara pendingin memenuhi ruangan.

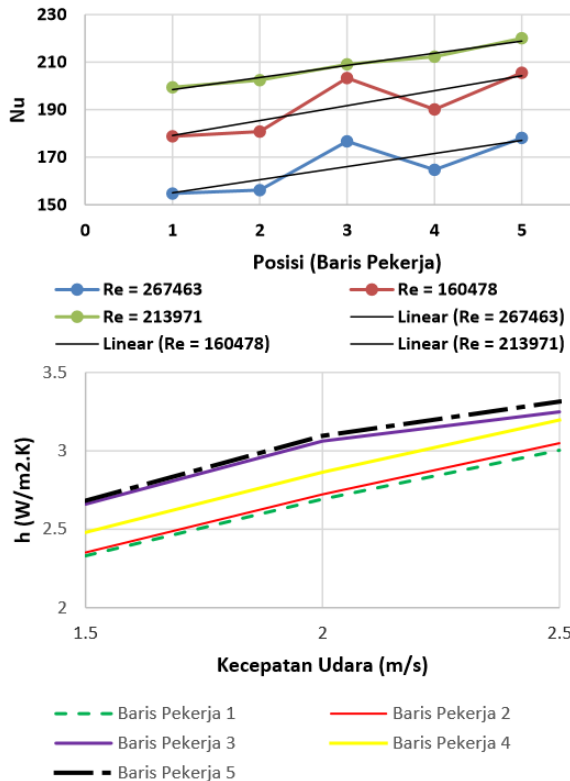
Dari hasil simulasi ini didapatkan visualisasi karakteristik aliran dan perpindahan panas yang melewati barisan pekerja yakni diantaranya distribusi temperatur dan kecepatan udara, seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 visualisasi kontur kecepatan udara dan temperatur udara dengan variasi kecepatan udara *inlet*. Pengaruh variasi kecepatan udara pendingin yang diberikan diharapkan dapat mendinginkan temperatur pada baris pekerja 1 -5.



Gambar 2.6 Pengaruh Variasi kecepatan udara pendingin terhadap distribusi temperatur udara bidang zy pada ketinggian 1,2 m

Gambar 2.6 menunjukkan distribusi temperatur udara pada ketinggian 1,2 m. Dapat terlihat melalui grafik di atas kecepatan udara pada jarak 12 m, 20 m, 24 m tidak memberikan perbedaan secara signifikan, yakni pada rentang 23°C – 25°C pada zona ini merupakan zona dimana para pekerja melakukan aktivitas pengisian oli. Dapat disimpulkan pada zona ini sudah memenuhi

kriteria zona kenyamanan mengacu pada standar ASHRAE dimana zona kenyamanan bagi para pekerja berada pada rentang suhu 23°C hingga 27°C .



Gambar 2.7 Analisa perpindahan panas nusselt number dan koefisien konveksi

Analisa dilakukan dengan memvariasikan kecepatan udara, yaitu 1,5 m/s; 2 m/s; 2,5 m/s. Data dari hasil simulasi dan perhitungan akan ditampilkan dalam grafik dan tabel hasil. Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil simulasi aka digunakan untuk menganalisa pengaruh kecepatan udara pendingin terhadap

distribusi temperatur udara dan perpindahan panas.

Seperti yang telah diketahui bahwa kecepatan udara berhubungan dengan *Reynolds Number*. Semakin tinggi kecepatan udara, maka *Reynolds Number* akan meningkat. Jika dibandingkan pada tiap-tiap variasi kecepatan udara, nilai *Nusselt Number* yang didapatkan pada tiap baris pekerja, dapat dilihat bahwa nilai *Nusselt Number* juga semakin tinggi. Pada baris pekerja 1–5 tidak mengalami peningkatan secara signifikan. Variasi kecepatan udara mempengaruhi besar *Reynolds Number*. Kemudian *Reynolds Number* sebanding dengan *Nusselt Number*. Sehingga kenaikan nilai *Nusselt Number* seiring kenaikan kecepatan udara inlet, yakni 150–290.

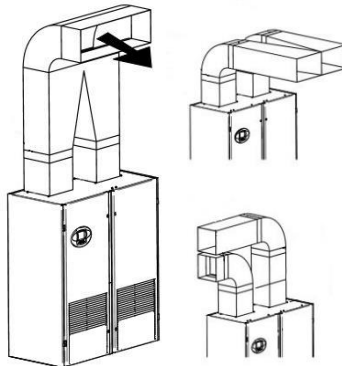
Hubungan *Nusselt Number* dengan koefisien *heat transfer* adalah berbanding lurus. Sama seperti pada *Nusselt Number*, pada koefisien *heat transfer* dapat dilihat, koefisien *heat transfer* paling besar berada pada kecepatan udara 2,5 m/s. Pada kecepatan udara ini, nilai *heat transfer coefficient* untuk tiap baris pekerja berada pada rentang 4,3–5,1 W/m².K. Kemudian koefisien *heat transfer* mengalami penurunan seiring dengan penurunan kecepatan udara pendingin. Dengan bertambahnya *Nusselt Number*, maka nilai dari h juga semakin besar.

2.2. Server Room

Sesuai dengan namanya *server room* adalah sebuah ruangan yang digunakan untuk menyimpan server (aplikasi dan *database*), perangkat jaringan (*router*, *hub* dll) dan perangkat lainnya yang terkait dengan operasional sistem sehari-hari seperti UPS, AC dan lain-lain. Sebuah ruang server harus memiliki standar keamanan yang melindungi kerja perangkat-perangkat di dalamnya dari mulai suhu udara, kelembaban, kebakaran dan akses masuk dari orang-orang yang tidak berkepentingan. Ruang server adalah aset bagi sebuah perusahaan karena di dalam ruangan ini terdapat aplikasi dan *database* pelanggan yang semakin hari akan semakin bernilai bagi perusahaan, oleh karena itu ruangan ini harus selalu dalam kondisi yang baik.

2.2.1. Computer Room Air Conditioning (CRAC)

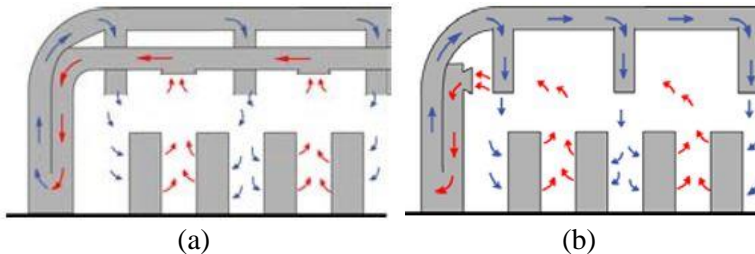
Sistem pendinginan untuk ruang server terdiri dari unit *Computer Room Air Conditioning* (CRAC) dan sistem distribusi udara. Terlihat pada gambar 2.8 adalah sistem CRAC *upflow inlet* dengan tambahan *ducting* sebagai sistem distribusi udara kondisinya. Aliran udara kondisi dialirkan melalui ducting yang sudah di desain dan akan di *supply* melalui *diffuser* yang ada di plafon. Udara akan turun vertikal ke bawah dan berbelok melewati server sebelum di hisap kembali ke *return air*, dimana posisi *return air* berada di bagian bawah CRAC. Untuk ketinggian posisi *return air* itu sendiri, dapat dimodifikasi sesuai dengan desain ruang server.



(Sumber : Liebert PEX)

Gambar 2.8 Upflow ducting configuration

Sistem pendinginan menggunakan CRAC memiliki berbagai macam jenis, tergantung dari kapasitas dan kemampuan untuk menghilangkan energi panas dari ruangan. Namun, perbedaan utama yang mempengaruhi kemampuan sistem pendingin adalah pada sistem distribusi udaranya (Rasmussen, 2003). Sistem distribusi udara pendingin memiliki *supply system* dan *return system*. *Supply system* mendistribusikan udara kondisi dari unit CRAC ke beban, dan *return system* membawa udara buang dari beban kembali ke CRAC.



(Sumber : Rasmussen, *Air Distribution Architecture Options for Mission Critical Facilities*, 2003)

Gambar 2.9 Tipe pendinginan dengan upflow

Tujuan penting dari sistem pendinginan ruang server adalah memisahkan antara udara panas keluaran dengan udara kondisi untuk mencegah *overheating* pada komponen server. Pemisahan ini juga secara signifikan meningkatkan efisiensi dan kapasitas pendinginan sistem. Terlihat pada gambar 2.9 (a) adalah sistem distribusi pendinginan dengan *locally ducted supply and locally ducted return*, dimana pada sistem distribusi seperti ini, udara panas keluaran dan udara kondisi terpisah. Sedangkan gambar 2.9 (b) *locally ducted supply and flooded return*, dimana udara panas keluaran dan udara kondisi rentan bercampur (Rasmussen, 2003).

2.2.2. Rak Server

Rak server adalah sebuah rak yang digunakan untuk meletakkan perangkat server atau jaringan *network* seperti *switch hub* dan komputer server. Rak server adalah sebuah rak yang memiliki bentuk memanjang ke atas berfungsi untuk mengefisienkan dan menghemat tempat dalam sebuah ruang server. Rak server biasa disebut juga dengan *rack mounting-server*, rak ini biasanya digunakan pada perusahaan yang membutuhkan tempat penyimpanan data yaitu pusat data. Adapun manfaat utama rak server ini adalah sebagai ruang atau tempat yang lebih efisiensi dan peralatan *maintenance* menjadi lebih mudah. Konfigurasi rak server juga bermanfaat untuk menyederhanakan pemasangan kabel antara komponen jaringan yang lain.

Selain itu dalam sebuah peralatan rak server juga dibutuhkan sistem pendinginan yang khusus digunakan untuk mencegah panas yang berlebihan. Pasalnya jika terdapat banyak panas yang berlebihan akan mengganggu kerja dari perangkat. Oleh karena itu, penggunaan sensor suhu yang diletakkan di rak server menjadi sebuah solusi untuk mengendalikan suhu.



Sumber: <https://cloudninja.com/dell-memory/rackmount-server/>

Gambar 2.10 Dell rackmount servers

2.3. Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah mekanisme perpindahan energi yang disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur, baik pada suatu media atau antar-media. Energi panas berpindah dengan tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Berikut ini merupakan penjelasan metode perpindahan panas yang terjadi.

2.3.1. Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan panas yang terjadi pada media yang memiliki perbedaan temperatur dan mekanisme secara fisiknya adalah aktivitas antara molekul yang lebih aktif ke molekul yang kurang aktif. Model matematik dari perpindahan panas secara konduksi sebagai berikut:

$$q_{cond}'' = -k \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2-1)$$

dimana :

- q_{cond}'' : *heat flux* konduksi, W/m²
 k : konduktivitas panas, W/m.K
 dT : beda temperatur, K
 dx : beda jarak, m

2.3.2. Konveksi

Konveksi merupakan bentuk perpindahan panas dimana molekul-molekul benda membawa energi panas dari satu titik ke titik lainnya. Umumnya terjadi pada benda cair dan gas. Secara matematis besarnya perpindahan panas konveksi dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

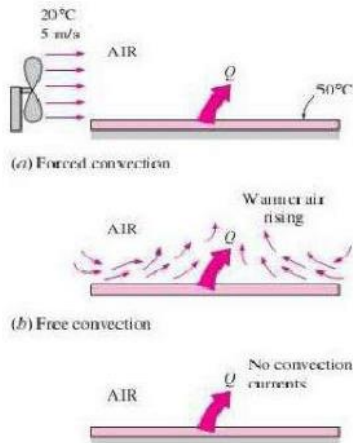
$$q_{conv}'' = h (T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (2-2)$$

dimana:

- q_{conv}'' : *heat flux* konveksi, W/m²
 h : koefisien konveksi, W/m²K
 T_s : temperatur permukaan, K
 T_∞ : temperatur fluida, K

Perpindahan panas konveksi diklasifikasikan dalam konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*) menurut cara menggerakkan alirannya. Konveksi alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi karena ada perbedaan densitas fluida tanpa dipengaruhi gaya dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran fluida yang melintasi plat panas.

Konveksi paksa adalah perpindahan panas aliran cairan atau gas yang disebabkan adanya tenaga dari luar. Konveksi paksa dapat pula terjadi karena arus fluida yang terjadi digerakkan oleh suatu peralatan mekanik (contoh : pompa dan *fan*). Contoh perpindahan panas secara konveksi paksa adalah plat panas dihembus udara dengan kipas/blower (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Perpindahan panas secara konveksi

2.3.3. Radiasi

Radiasi merupakan cara perpindahan energi panas dengan gelombang elektromagnetik dari suatu permukaan benda ke lingkungannya tanpa memerlukan media penghantar. Model matematik dari perpindahan panas secara radiasi ini adalah sebagai berikut :

$$q_{rad}'' = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{sur}^4) \dots \dots \dots (2-3)$$

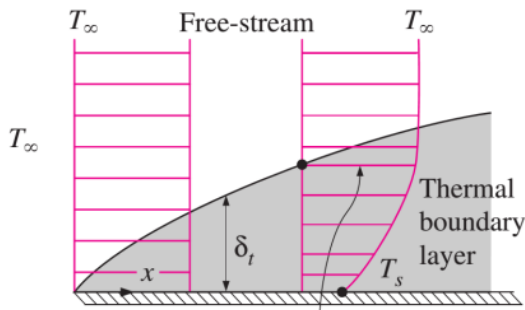
dimana:

- q_{rad}'' : heat flux radiasi, W/m²
- σ : konstanta Stefan-Boltzman, 5.67×10^{-8} W/m²K⁴
- ε : emisivitas bahan
- T_s : temperatur permukaan, K
- T_{sur} : temperatur lingkungan, K

Untuk benda hitam sempurna atau *black body* mempunyai nilai $\varepsilon=1$, karena benda hitam merupakan pemancar dan penyerap panas yang baik. Sedangkan permukaan yang mengkilap termasuk pemancar dan penyerap panas yang buruk memiliki nilai $\varepsilon=0$.

2.4. Lapis Batas Termal (*Thermal Boundary Layer*)

Lapisan batas termal (*thermal boundary layer*) yaitu daerah dimana terdapat gradien suhu dalam aliran. Gradien suhu itu akibat proses pertukaran panas antara dinding dengan fluida. Bentuk profil kecepatan di dalam lapisan batas bergantung pada jenis alirannya. Sebagai contoh, perhatikanlah aliran udara melewati sebuah plat datar, yang ditempatkan dengan permukaan sejajar terhadap aliran. Pada tepi depan (*leading edge*) plat ($x = 0$) dalam Gambar 2.12, hanya partikel-partikel fluida yang langsung bersinggungan dengan permukaan tersebut yang menjadi lambat gerakannya, sedangkan fluida selebihnya terus bergerak dengan kecepatan aliran bebas (*free stream*) yang tidak terganggu di depan plat. Dengan majunya sepanjang pelat, gaya-gaya geser menyebabkan terhambatnya semakin banyak fluida, dan tebal lapisan batas meningkat.



Gambar 2.12 *Thermal boundary layer*

Temperatur fluida bervariasi sepanjang lapis batas. Untuk memudahkan asumsi, bahwa properti fluida sebenarnya berubah terhadap temperatur, maka :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \dots \dots \dots (2-4)$$

dimana,

T_f = Temperatur film, K

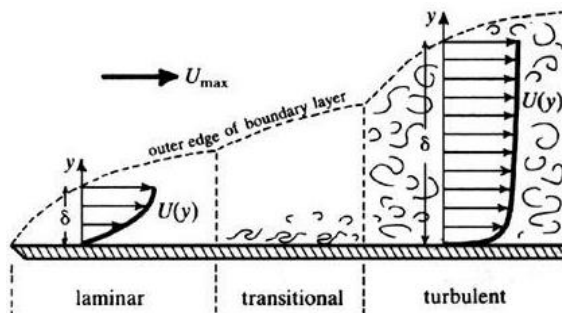
T_s = Temperatur *surface*, K

T_∞ = Temperatur fluida, K

2.5. Aliran Laminer dan Turbulen

Aliran laminar dan turbulen ini dibedakan berdasarkan pada karakteristik aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami oleh suatu aliran yang mempengaruhi gerak dari partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami oleh medan aliran akibat getaran, ketidakrataan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida tersebut dan aliran fluida tersebut disebut aliran laminar.

Gangguan yang timbul semakin besar hingga tercapai kondisi peralihan pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, di mana partikel bergerak secara fluktuasi atau acak dan terjadi percampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatasan. Kondisi aliran yang demikian disebut dengan aliran turbulen. Kondisi aliran yang laminar dan turbulen ini dapat dinyatakan dengan Bilangan *Reynold*.



Sumber : Incropera, F. P. and D. P. Dewitt, hal 359

Gambar 2.13 Profil-profil kecepatan untuk lapisan batas melewati pelat datar

1. *Reynolds Number*

Reynolds number (Re) atau Bilangan *Reynolds* adalah suatu bilangan tanpa dimensi yang menganalisa gaya inersia Fluida. Jenis aliran Fluida dan gaya gesekan yang terjadi dengan permukaannya akan menentukan Bilangan *Reynolds*. Aliran Fluida dapat dibagi dalam tiga kategori: Laminar, Transisi dan Turbulen.

Untuk membedakan antara aliran laminar, transisi, dan turbulen maka digunakan bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan *Reynolds*, yang merupakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya viskos. Jadi, rumus Bilangan *Reynolds* adalah :

$$R_e = \frac{V_{\infty} x}{\nu} \dots\dots\dots (2-5)$$

dimana :

Re = *Reynolds number*
 V_{∞} = kecepatan fluida, kg/sm
 ν = viskositas, kg/s m
 x = jarak dari *leading edge*, m

Pada aliran laminar molekul molekul fluida mengalir mengikuti garis-garis aliran secara teratur. Aliran turbulen terjadi saat molekul-molekul fluida mengalir secara acak tanpa mengikuti garis aliran. Aliran transisi adalah aliran yang berada diantara kondisi laminar dan turbulen, biasanya pada kondisi ini aliran berubah-ubah antara transien dan turbulen sebelum benar-benar memasuki daerah turbulen penuh.

Nilai Bilangan *Reynolds* yang kecil ($<5 \times 10^5$) pada plat datar menunjukkan aliran bersifat laminar sedangkan nilai yang besar menunjukkan aliran turbulen ($\geq 5 \times 10^5$). Nilai Bilangan *Reynolds* saat aliran menjadi turbulen disebut bilangan *Reynolds* kritis yang nilainya berbeda-beda tergantung bentuk geometrinya.

2. *Prandtl Number*

Bilangan tak berdimensi selanjutnya adalah Bilangan *Prandtl* yang merupakan perbandingan antara ketebalan lapis

batas kecepatan dengan ketebalan lapis batas termal. Bilangan *Prandtl* (*Pr*) merupakan sifat-sifat fluida saja dan hubungan antara distribusi suhu dan distribusi kecepatan. Bila bilangan *Prandtl*-nya lebih kecil dari satu, gradien suhu di dekat permukaan lebih landai daripada gradien kecepatan, dan bagi fluida yang bilangan *Prandtl*-nya lebih besar daripada satu gradien suhunya lebih curam daripada gradien kecepatan. Bilangan *Prandtl* dinyatakan dengan persamaan :

$$P_r = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\frac{\delta}{\delta_t} = P_r^{1/3} \dots\dots\dots (2-7)$$

dimana : C_p = Kalor spesifik fluida, J/kg K
 k = Konduktivitas termal, Watt
 μ = Viskositas, kg/s m
 v = Viskositas kinematik, m²/s
 α = Difusivitas termal, m²/s

Nilai Bilangan *Prandtl* berkisar pada nilai 0,01 untuk logam cair, 1 untuk gas, 10 untuk air, dan 10000 untuk minyak berat. Difusivitas kalor akan berlangsung dengan cepat pada logam cair (*Pr* << 1) dan berlangsung lambat pada minyak (*Pr* >>1). Pada umumnya nilai Bilangan *Prandtl* ditentukan menggunakan tabel sifat zat.

Tabel 2.1 Rentang nilai bilangan prandtl untuk fluida

Cairan	Pr
Logam cair	0,004 – 0,05
Gas	0,7 – 1,0
Air	1,7 – 13,7
Cairan Organik Ringan	5 – 50
Minyak	50 – 100000
Gliserin	2000 - 100000

3. *Nusselt Number*

Perpindahan kalor yang terjadi pada suatu lapisan fluida terjadi melalui proses konduksi dan konveksi. Bilangan *Nusselt* menyatakan perbandingan antara perpindahan kalor konveksi pada suatu lapisan fluida dibandingkan dengan perpindahan kalor konduksi pada lapisan fluida tersebut. Dapat di tulis dengan persamaan :

$$Nu_x = \frac{h x}{k} \dots\dots\dots (2-8)$$

dimana : h = Koefisien perpindahan panas konveksi, W/m².K
 x = Panjang karakteristik, m
 k = Konduktivitas bahan, W/m K

Semakin besar nilai bilangan *Nusselt*, maka konveksi yang terjadi semakin efektif. Bilangan *Nusselt* yang bernilai 1 menunjukkan bahwa perpindahan kalor yang terjadi pada lapisan fluida tersebut hanya melalui konduksi.

4. *Laminar Flow*

Laminar flow over on isothermal plate

Koefisien perpindahan panas (h) untuk sebuah plat datar dapat ditentukan/diprediksi secara teori dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum dan energi atau secara numerik. Tetapi juga dapat ditentukan secara eksperimen sehingga didapat persamaan empiris :

$$Nu = \frac{h l}{k} = C Re_L^m Pr^n \dots\dots\dots (2-9)$$

dimana : m, n adalah konstanta eksponen dan harga C ditentukan oleh geometri & aliran, sedangkan L adalah panjang *plate*.

Heat transfer coefficient bervariasi sepanjang permukaan plat datar akibat perubahan kecepatan dan lapis batas termal. Nilai rata-rata dapat diperoleh dengan mengintegalkan nilai lokalnya.

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \dots\dots\dots (2-10)$$

Untuk kasus *laminar flow* dapat didekati dengan metode empiris, dimana angka *Nusselt* lokal pada lokasi x untuk aliran laminar pada *plate* datar :

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0,332 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2-11)$$

dimana, $Pr \geq 0,6$

Nu rata-rata pada seluruh *plate* didapatkan dengan mengintegalkan nilai lokalnya pada persamaan (2.17).

$$\overline{Nu_x} = \frac{h_x x}{k} = 0,664 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2-12)$$

dimana, $Pr \geq 0,6$

$$Re_{x,c} = 5 \times 10^5 = \frac{V_{\infty} x_{x,c}}{\nu} \dots\dots\dots (2-13)$$

sehingga persamaan di atas (aliran laminar) dapat di pakai untuk $x \leq x_{x,c}$.

5. *Turbulen flow over an isothermal plate*

Berdasarkan hasil eksperimen untuk *turbulent flow* dengan *reynolds number* mencapai koefisien gerakan lokal dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Nu_x = St \cdot Re_x \cdot Pr = 0,0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/2} \dots\dots\dots (2-14)$$

dimana, $5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^8$

$$0,6 \leq Pr \leq 60$$

6. *Mixed Boundary Layer Condition*

Pada kasus *mixed boundary layer* dapat didekati dengan rumus :

$$\overline{h_L} = \frac{1}{L} (\int_0^{x_c} h_{lam} dx + \int_{x_c}^x h_{turb} dx) \dots \dots \dots (2-15)$$

sehingga,

$$\overline{Nu_L} = \left(0,037 Re_L^{4/5} - A \right) Pr^{1/3} \dots \dots \dots (2-16)$$

dimana, $0,6 \leq Pr \leq 60$

$$Re_{xc} \leq Re_L \leq 10^8$$

$$A = 0,037 Re_{x,c}^{4/5} - 0,664 Re_{x,c}^{1/2}$$

7. Flat plate with constant heat flux condition

Ada kemungkinan *uniform surface heat flux* telah berpengaruh daripada *uniform temperature* pada kasus kondisi ini maka nilai Nusselt number dirumuskan :

Laminar flow

$$Nu_x = 0,453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \dots \dots \dots (2-17)$$

$$Pr \geq 0,6$$

Turbulant flow

$$Nu_x = 0,0308 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \dots \dots \dots (2-18)$$

$$0,6 \leq Pr \leq 60$$

Nusselt number

$$\overline{Nu_x} = 0,680 Re_x^{1/2} Pr^{1/2} \dots \dots \dots (2-19)$$

8. Noncircular cylinders in cross flow of a gas

Untuk mencari kondisi rata-rata keseluruhan, dapat menggunakan korelasi empiris Hilpert yang telah dimodifikasi untuk memperhitungkan fluida berbagai *Prandtl Numbers*,

$$\overline{Nu_D} = \frac{\overline{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \dots \dots \dots (2-20)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \dots \dots \dots (2-21)$$

dimana,



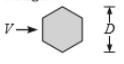
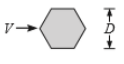

D_h = diameter hidrolik, m
 A_c = luasan *inlet* fluida, m²
 P = keliling *inlet* fluida, m

dengan $Pr \geq 0.7$. Persamaan 2-20 dapat digunakan untuk aliran yang tidak berbentuk silinder dengan karakteristik panjang D_h dan untuk parameter C dan m dapat di lihat pada table 2.2. Persamaan 2-20, semua properties dievaluasi pada temperatur film. Untuk persamaan dengan semua nilai Re_D , $Pr \geq 0,2$ dapat diselesaikan dengan:

$$\overline{Nu_D} = 0,3 + \frac{0,62Re_D^{1/2}Pr^{1/3}}{[1+(0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} [1 + (\frac{Re_D}{282,000})^{5/8}]^{4/5} \dots (2.22)$$

dimana semua *properties* dievaluasi pada temperatur film.

Tabel 2.2 *Constants of equation 2.20 for noncircular cylinders in cross flow of a gas*

Geometry	Re_D	C	m
Square 	6000–60,000	0.304	0.59
	5000–60,000	0.158	0.66
Hexagon 	5200–20,400 20,400–105,000	0.164 0.039	0.638 0.78
	4500–90,700	0.150	0.638
Thin plate perpendicular to flow 	Front 10,000–50,000 Back 7000–80,000	0.667 0.191	0.500 0.667

9. The vertical plate Natural Convection

Natural konveksi terjadi antara sebuah permukaan dengan fluida yang bergerak dengan kecepatan yang sangat

kecil yang diakibatkan oleh *buoyancy force*. Gaya *buoyancy* ini timbul karena adanya gradien densitas fluida dan *body force* yang berbanding lurus dengan densitas fluida. *Natural convection* sangat ditentukan oleh parameter tak berdimensi yaitu *Rayleigh Number* yang menyatakan hubungan perbandingan antara *buoyancy effect* dan properti termal dari fluida yang dinyatakan dengan persamaan :

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \dots\dots\dots (2.23)$$

Grasshof Number yang menyatakan perbandingan antara *buoyancy force* dengan *viscous force* yang terjadi pada fluida :

$$Gr_L \equiv \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (2.24)$$

Pada plat datar vertikal seperti pada kasus penelitian kali ini, nilai dari *Nusselt Number* yang digunakan untuk mencari koefisien konveksi fluida :

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$Ra_L \leq 10^9$$

2.6. Pemodelan CFD (*Computational Fluid Dynamic*)

CFD (*Computational Fluid Dynamic*) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisa pemodelan berdasarkan persamaan kontinuitas, momentum, dan energi. Metode ini sering digunakan sebagai proses simulasi *thermalfluid* untuk menyelesaikan berbagai permasalahan *engineering*. Dalam menggunakan metode ini, perlu adanya pemahaman mendalam ttang fenomena fluida dan perpindahan panas agar simulasi yang dilakukan cukup merepresentasikan kondisi nyata.

Dalam melakukan penelitian ini dilakukan proses simulasi dengan tiga langkah pengerjaan, yaitu *Pre-Processing*, *Processing*

dan *Post-Processing*.

1. *Pre-Processing*

Pada langkah *Pre-Processing* digunakan *software* Gambit untuk pembuatan geometri model. Geometri model haus sesuai dengan dimensi serta parameter lain pada kondisi nyata. Langkah yang dilakukan selajutnya adalah membagi domain pemodean yan telah dibuat menjadi bagian bagian kecil (*grid*). Pada umumnya, proses ini dinamakan *meshing*. Kualitas dari hasil smulasi sangat dipengaruhi oleh kualitas *mshing*. Semakin besar jumlah *grid*, maka kualitas hasil siulasi seakin baik. Pada umumnya, jumlah *grid* yang dibuat harus optimal karena semakn bayak jumlah *grid*, maka semakin lama juga proses simulasi berlangsung dan diperlukan perangkat computer dengan kwaitas yang tinggi. Langkah selanjutnya adalah pemberian kondisi batas (*boundary condition*) seperti *wall*, *velocity inlet* *ouflow*, dan lain lain. Pemberian kondisi batas ini perlu dlakukan untuk mendefinisikan domain yang telah dibuat.

2. *Processing*

Tahap selanjutnya adalah *Processing* yang merupakan tahap simulasi pada domain pemodelan yang telah dibuat. Keseluruhan tahap ini dilakuka dengan menggunakan perangkat lunak Fluent. Pada tahap *Processing*, langkah yang harus dilakukan adalah memberikan beberapa parameter yang digunakan untuk pross simulasi. Beberapa parameter tersebut, yaitu :

a. Model 3D

Pada penelitian kali ini, model tiga dimensi digunakan karena domain yang disimulasikan ruangan yang terdapat server didalamnya dan berbentuk tiga dimensi. Terdapat 2 jenis model simulasi yaitu *single precision* dan *double precision*. Pemodelan jenis *double precision* digunakan karena pada geometri 3D dengan terdapat volume kecil didalam suatu ruangan lebih di anjurkan menggunakan pemodelan jenis *double precision*.

b. *Solver*

Pada pengaturan solver, terdapat pengaturan tentang jenis basis dari simulasi. Basis tekanan dapat dipilih jika fluida pada simulasi diasumsikan tidak mengalami perubahan *density*. Bila *density* fluida diasumsikan berubah saat proses simulasi, maka basis yang dipilih harus basis *density*.

c. *Energy Equation*

Pengaturan *Energy Equation* dapat diaktifkan bila simulasi yang dilakukan membutuhkan adanya perhitungan persamaan energi. Perhitungan persamaan energi perlu dilakukan pada simulasi yang memerlukan adanya Analisa tentang distribusi perpindahan panas, *Nusselt Number*, dll.

d. *Materials*

Pada pengaturan *materials*, terdapat pengaturan tentang material fluida dan material *solid* yang digunakan pada saat simulasi berlangsung. Jenis dan *properties* material harus sesuai dengan kondisi operasi nyata agar simulasi yang dilakukan menghasilkan data data yang akurat.

e. *Operating Condition*

Pada menu *Operating Condition*, terdapat pengaturan tentang tekanan yang ada pada domain simulasi. Besarnya nilai tekanan tersebut harus sesuai dengan kondisi realita yang ada.

f. *Boundary Condition*

Pada menu *Boundary Condition*, terdapat pengaturan pemberian nilai dari hasil pemberian kondisi batas taha *Pre-Processing*.

g. *Control Monitoring and residual Solution*

Pada menu *Control Monitoring and Residual Solution*, terdapat pengaturan tentang jenis perhitungan numerik seperti *First Order*, *Second Order Upwind*, dan lain lain. Selain itu, pada

menu ini juga menu ini juga dilakukan pengaturan tentang pembatasan nilai *error* yang diterima dari hasil proses perhitungan. Semakin kecil batas *error* yang diterima. Maka hasil proses simulasi akan semakin akurat.

h. *Initialize Condition*

Pada menu *Initializa Condition*, terdapat pengaturan tentang nilai awal dari proses perhitungan. Nilai awal dari proses perhitungan secara numerik ini dapat dilakukan dari berbagai tempat pada domain.

i. *Iteration*

Setelah seluruh proses pengamatan dilakukan proses simulasi dimulai dengan melakukan iterasi hingga mencapai *convergen* jika sistem tidak mencapai *convergen* maka dapat dilihat pada nilai *flux* dari *inlet* dan *outlet*, jika nilainya 10^{-7} maka sistem dapat dikatakan *convergen*.

3. *Post Processing*

Tahap yang terakhir yaitu *Post-Processing*. Pada tahap ini, dilakukan analisis dari hasil simulasi secara keseluruhan. Data yang dihasilkan dapat ditampilkan secara kualitatif seperti kontur kecepatan dan kontur temperature, lalu vector dari kecepatan dan yang terakhir arah aliran yang dapat dilihat pada *pathline*. Selain itu, hasil dari simulasi dapat ditampilkan secara kuantitatif seperti nilai *Nusselt Number*, *Heat Flux*, dan nilai temperatur. Dari kedua jenis data ini, analisis yang dilakukan akan semakin akurat, sehingga karakteristik dari aliran dan perpindahan panas akan mudah dilakukan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Pada penyusunan tugas akhir ini, metode penelitian yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan *software* ANSYS 16.2 yang nantinya digunakan sebagai acuan untuk melakukan analisa karakteristik aliran dan perpindahan panas pada server. Terdapat beberapa tahapan untuk menyelesaikan penelitian ini, yaitu:

1. Studi Kasus

Permasalahan yang diangkat merupakan usaha untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas dari server dengan variasi posisi ketinggian *outlet* dengan *top flow inlet*. Untuk mendapatkan hasil tersebut, maka akan dilakukan simulasi numerik dengan *software* ANSYS 16.2 dan teori perhitungan perpindahan panas.

2. Studi Literatur

Terdapat beberapa penelitian terdahulu serta beberapa teori-teori yang berhubungan dengan tugas akhir ini. Teori-teori serta literatur penelitian terdahulu di dapat dari berbagai macam sumber, seperti jurnal, buku, dan lain-lain.

3. Pengumpulan Data

Dalam tugas akhir ini yang menjadi obyek penelitian adalah ruang server. Dengan keadaan *existing* pada ruang server, mengacu pada ASHRAE dan penelitian terdahulu, diperoleh data-data untuk mempermudah pemodelan dan simulasi yang akan dilakukan.

4. Pemodelan dan Simulasi

Tahapan selanjutnya, yaitu membuat domain pemodelan berdasarkan dimensi dari data yang telah di dapat. Pembuatan

domain ini dilakukan dengan menggunakan Gambit 2.4.6, lalu disimulasikan menggunakan ANSYS 16.2 untuk mengetahui karakteristik aliran serta perpindahan panasnya.

5. Pengolahan dan Analisa Data Hasil Simulasi

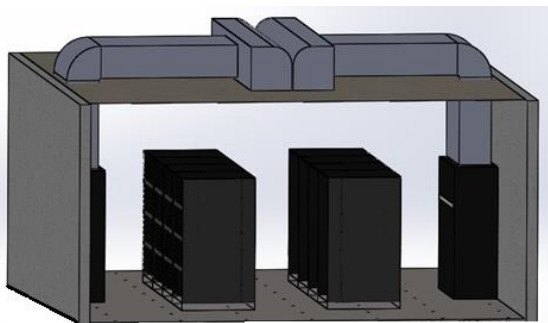
Setelah mendapatkan data dari hasil simulasi kemudian data tersebut diolah dan dianalisa. Data ditampilkan dalam bentuk kontur dan vektor untuk dapat dianalisa secara kualitatif. Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil penelitian yang telah dibahas, kemudian disusun dalam bentuk laporan sistematis.

3.2. Pengumpulan Data

Dalam tugas akhir ini yang menjadi obyek penelitian adalah ruang server, dengan sistem pendinginan *top flow inlet*, temperatur referensi (*inlet*) 15°C , variasi kecepatan *inlet* 2 m/s; 2,5 m/s; 3 m/s dan besar *heat flux* pada setiap rak server sebesar 250 W/m^2 .

Data yang lain sebagai berikut:

Ø Dimensi ruangan	: 6,8m x 6m x 3m
Ø Dimensi server	: 1m x 0,8m x 2,3m
Ø Dimensi rak	: 1m x 0,8m x 0,3m
Ø Dimensi <i>Outlet</i>	: 1,2m x 0,4m
Ø Jumlah server	: 8 unit
Ø Jumlah rak	: 32 buah



Gambar 3.1 Model ruang server

Gambar 3.1 merupakan model ruang server. Melihat terlalu kompleksnya model ruang server, maka geometri ruangan dibuat menjadi lebih sederhana dan sesuai tujuan yang akan dicapai. Simplifikasi ruangan ini meliputi : pemilihan area simulasi, memberi jarak antar server, membuat rak pada server dan dua buah *outlet*. Setelah membuat simplifikasi ruangan kemudian diambil suatu zona yang akan ditinjau lebih lanjut dalam simulasi.

3.3. Pemodelan dan Simulasi

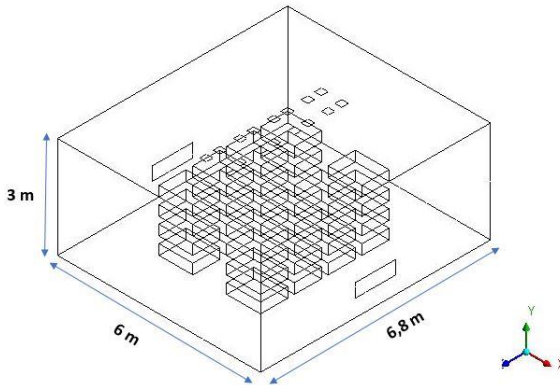
Pemodelan dan simulasi yang digunakan adalah model tiga dimensi. Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan *inlet* dan ketinggian posisi *outlet* terhadap lantai. Pemodelan dan simulasi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6 dan ANSYS 16.2. Urutan pembuatan adalah sebagai berikut:

3.3.1. Tahap *Pre-Processing*

Tahap *pre-processing* adalah tahap pembuatan geometri model menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6. Pembuatan geometri kali ini mengacu pada data-data dimensi ruang server yang sudah didapatkan. Pembuatan geometri pemodelan juga dilakukan untuk modifikasi, yaitu posisi ketinggian *outlet* $y = 0,5\text{m}; 1\text{m}; 1,8\text{m}; 3\text{m}$. Hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas dari hasil simulasi pada kondisi modifikasi. Adapun proses yang dilakukan dalam *software* GAMBIT 2.4.6 adalah sebagai berikut:

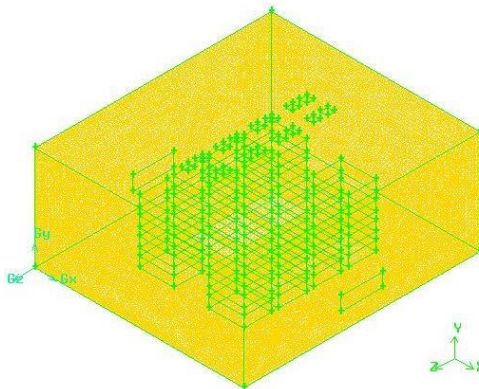
a. Membuat Model

Yaitu membuat model uji berupa bentuk ruang server. Ada empat bentuk model yang akan disimulasikan. Berikut ini adalah salah satu gambar bentuk model uji dengan posisi ketinggian *outlet* $y = 0,5\text{m}$:



Gambar 3.2 Hasil pembuatan geometri ruang server

b. Membuat Meshing

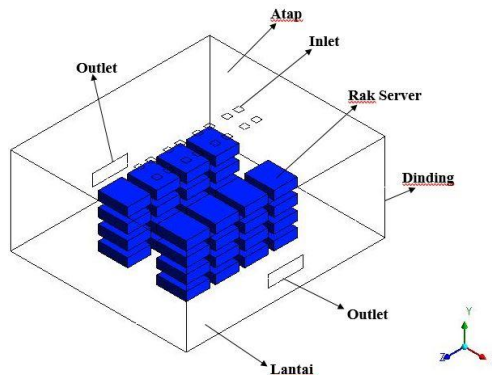


Gambar 3.3 Hasil meshing ruang server

Yaitu membagi model *solid* menjadi elemen-elemen kecil, sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Kualitas dan kuantitas *mesh* yang digunakan sangat mempengaruhi proses penyelesaian simulasi. *Meshing* yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini antara lain: *hexagonal*, *hexagonal/wedge*.

c. Menentukan *Boundary Condition* yang Digunakan

Setelah *meshing* dibuat kemudian dilakukan penentuan *boundary condition*. Untuk *inlet* fluida berupa udara yang bersifat *incompressible*, maka dipilih *boundary condition* berupa *velocity inlet*. Pada bagian *outlet* dipilih *boundary condition* berupa *outflow*. Sedangkan *boundary condition* untuk rak server, atap, dinding dan lantai berupa *wall*.



Gambar 3.4 *Boundary condition*

3.3.2. Tahap *Processing*

Pada tahap ini dilakukan proses simulasi berdasarkan hasil *meshing* dari geometri yang telah dibuat dengan menggunakan *software* ANSYS 16.2. Adapun proses yang dilakukan antara lain:

1. *Solver Models*

Pemodelan ini menggunakan *solver* 3D dengan keakuratan tunggal. Pada penelitian ini digunakan *solver segregated* untuk menyelesaikan persamaan tersebut secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain). *Solver* yang digunakan berbasis tekanan (*pressure based*). Pada sub menu *viscous*, dipilih *model k-ε Standar*. Pada sub menu *energy*, persamaan *energy* diaktifkan dalam

mendukung penyelesaian *heat transfer* terhadap perubahan temperatur.

2. *Materials*

Dalam tahap ini dilakukan pengaturan *properties* fluida masuk berupa udara dengan temperatur *inlet* sebesar 15°C. *Properties* diperoleh dengan melihat tabel A.4 untuk udara pada buku “*Fundamental Heat and Mass Transfer sixth edition*” karya Incropera, dkk (2002). (Lampiran)

3. *Operating Condition*

Merupakan perkiraan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada daerah operasi yakni sebesar 1 atm (101325 Pa).

4. *Boundary Condition*

Pada simulasi ini menggunakan kondisi batas yang terlihat pada tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Boundary condition

<i>Boundary Condition</i>	<i>Keterangan</i>	<i>Nilai</i>
<i>Top flow inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>	$V = 2 \text{ m/s}; 2,5 \text{ m/s}; 3 \text{ m/s}$
<i>Outlet</i>	<i>Outflow</i>	$y = 0,5\text{m}; 1\text{m}; 1,8\text{m}; 3\text{m}$
Atap	<i>Wall</i>	27°C
Lantai	<i>Wall</i>	27°C
Dinding	<i>Wall</i>	27°C
Rak Server	<i>Heat flux constant</i>	250W/m ²

5. *Control and Monitoring Solutions*

Solution control untuk metode *steady* yang digunakan adalah metode *pressure-velocity coupling* adalah PISO dengan diskritisasi standar untuk *pressure* dan *second order upwind* untuk parameter lainnya. Pada *monitoring solutions* dilakukan pengaturan kriteria *residual* untuk parameter *energy* sebesar

10^{-6} , sedangkan parameter lain diatur tingkat konvergensi sebesar 10^{-4} .

6. *Initialize Condition*

Pada menu *initialize condition*, terdapat pengaturan tentang nilai awal dari proses perhitungan. Nilai awal dari proses perhitungan secara numerik ini dapat dilakukan dari berbagai tempat pada domain.

7. *Iteration*

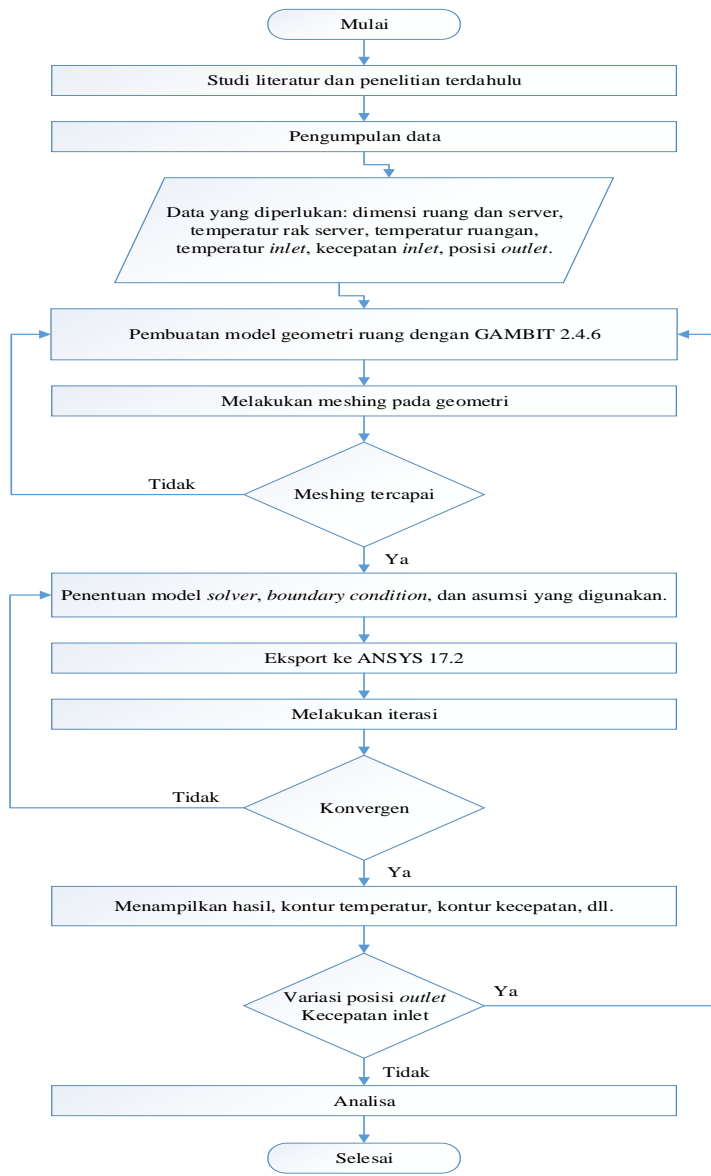
Langkah terakhir proses pengaturan simulasi ini adalah *iteration*. Pada menu ini terdapat pengaturan tentang batasan jumlah iterasi yang dilakukan. Proses iterasi akan berhenti bila *error* hasil perhitungan telah memenuhi kriteria dari hasil pengaturan pada tahap *Control Monitoring And Residual Solution*.

3.3.3. Tahap *Post-Processing*

Merupakan tampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Penggunaan model numerik dapat menghasilkan kontur temperatur dan vektor kecepatan yang selanjutnya akan dianalisa mengenai distribusi temperatur dan kecepatan udara yang terjadi di dalam ruang server. Kontur yang ditampilkan yaitu pada sumbu X (x/l), sumbu Y (y/h), dan sumbu Z (z/w). Data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan pola aliran yang ditampilkan dengan kontur temperatur dan vektor kecepatan.

3.4. *Flowchart Penelitian*

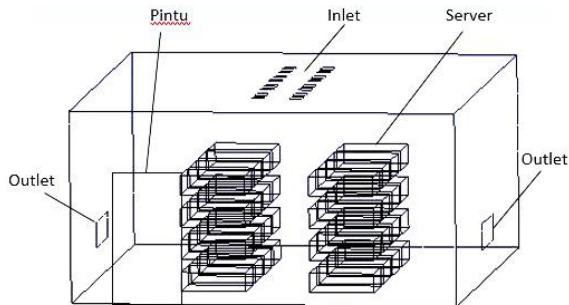
Dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, dari pengambilan data hingga tampilan akhir dapat dilihat pada Gambar 3.4 *Flowchart Tahapan Penelitian*.



Gambar 3.5 Flowchart Tahapan Penelitian

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pemodelan geometri ruangan, server, lokasi *outlet*, dan *inlet* disimulasikan dengan CFD. Pada proses simulasi menggunakan CFD akan menampilkan deskripsi aliran fluida, temperatur udara dan perpindahan panas di dalam ruang server, khususnya pada rak server. Simulasi distribusi kecepatan udara dan temperatur udara pada ruang server menggunakan ANSYS 16.2 dengan model tiga dimensi. Setelah proses iterasi dilakukan, maka diperoleh data hasil *post-processing* dari permodelan yang meliputi kontur pola aliran (*Pathline*), kontur vektor kecepatan udara dan kontur distribusi temperatur udara.

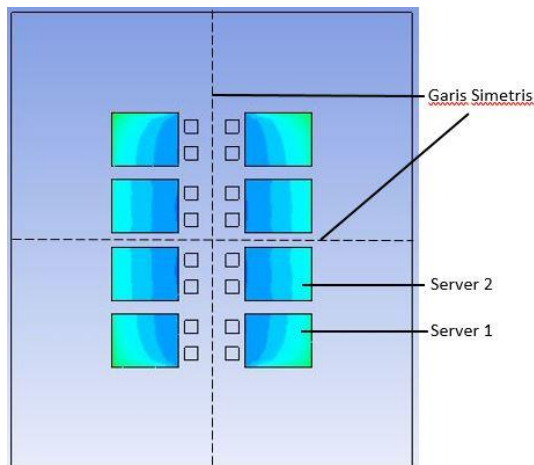


Gambar 4.1 Hasil domain tiga dimensi ruang server

Gambar 4.1 di atas menunjukkan pemodelan domain yang disimulasikan. Adapun domain yang disimulasikan terdiri atas domain dengan variasi posisi ketinggian *outlet*. Melalui hasil *post-processing* yang didapatkan, akan dilihat kontur kecepatan udara dan distribusi temperatur udara beberapa potongan *iso-surface* pada titik yang ditentukan. Terdapat empat kondisi ruang server yang disimulasikan, yaitu variasi *outlet* $y = 0,5\text{m}$; 1m ; $1,8\text{m}$; 3m . Untuk $y = 3\text{ m}$, posisi *outlet* berada pada plafon, sejajar dengan *inlet*. Udara dingin dengan temperatur udara 15°C masuk ke dalam ruang server dengan variasi kecepatan udara: 2 m/s ; $2,5\text{ m/s}$; dan

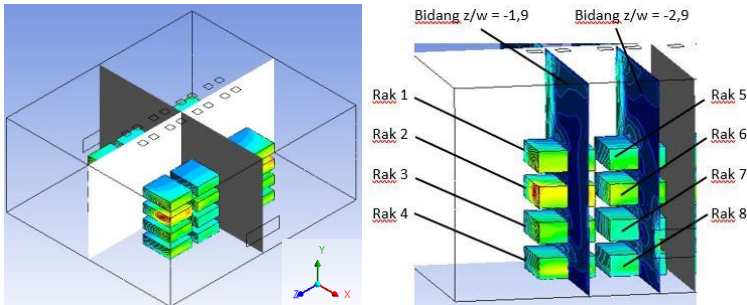
3 m/. Udara dingin ini masuk melalui *inlet diffuser* berbentuk persegi dengan ketinggian 3 m (plafon) dari lantai ruang server.

Pada simulasi ini dapat dilihat fenomena udara melalui pola aliran udara yang terbentuk. Udara dingin melalui *diffuser* memiliki massa jenis (*density*) yang lebih besar. Udara dingin akan turun perlahan, sedangkan aliran udara *supply* dari *inlet diffuser* mengalami penurunan kecepatan udara dan menyebar lebih luas ketika mencapai lantai. Sifat udara tidak mampu membentuk aliran berbelok secara tiba-tiba, tetapi karena posisi *outlet* terletak di sebelah kiri dan kanan, maka aliran udara dingin sebagian berbelok karena adanya perbedaan tekanan, sehingga aliran udara dingin akan berbelok melewati rak server sebelum keluar melalui *outlet*. Melalui variasi posisi ketinggian *outlet* dan kecepatan *inlet* yang disimulasikan, akan memperlihatkan pola aliran kecepatan udara dan distribusi temperatur udara terhadap server. Distribusi yang terjadi pada tiap variasi posisi ketinggian *outlet* dan kecepatan udara ini akan berkaitan dengan besarnya perpindahan panas yang terjadi. Karena kecepatan udara aliran melalui bukaan *inlet diffuser* akan berbeda, maka distribusi *Nusselt Number* dan koefisien *heat transfer* juga berbeda.



Gambar 4.2 Tampak atas ruang server

Dari gambar 4.2 akan dilakukan penjelasan mengenai pengambilan data kontur distribusi kecepatan dan kontur distribusi temperatur. Garis putus-putus menjelaskan bahwa posisi server 1 dan 2 adalah simetris terhadap server yang lain. Jadi, pembahasan akan dilakukan pada server 1 dan 2 saja.



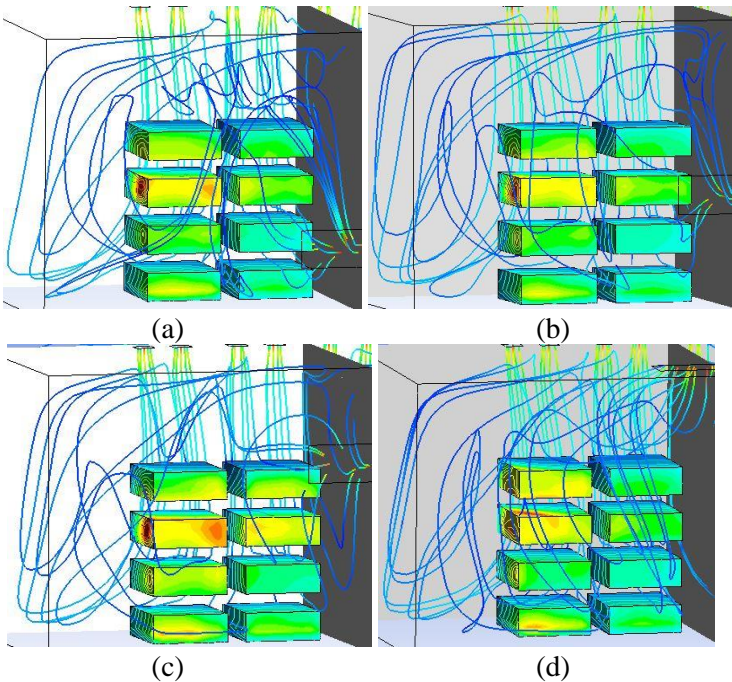
Gambar 4.3 Isometrik ruang server dan potongan iso-surface

Penelitian tugas akhir ini dilakukan simulasi secara *steady*. Nilai *heat flux* yang dianalisa adalah dari tiap rak server, yaitu sebesar 250 W/m^2 . Analisa dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini adalah dengan melakukan pemotongan *iso-surface* pada server 1 dan server 2. Pada Gambar 4.3 menampilkan potongan *iso-surface* masing-masing bidang z untuk setiap posisi ketinggian *outlet* dan variasi kecepatan udara pendingin. Bidang z adalah untuk menganalisa pola kecepatan udara aliran dan distribusi temperatur pada server 1 dan server 2, yaitu $z/w = -1,9$ dan $z/w = -2,9$. Ketinggian ruang server dibawah sumbu y adalah 3 m.

Gambar 4.3 merupakan tampilan posisi server pada bidang $-Z$. Untuk mengetahui karakteristik daerah analisa pada server, maka perlu diambil data dari simulator. Data yang diperoleh yakni data mentah yang nantinya akan diolah menjadi grafik. Grafik yang akan dibahas pada analisa kuantitatif adalah grafik kecepatan udara dingin, *nusselt number*, dan koefisien *heat transfer* yang akan ditinjau dari rak terpanas.

4.1. Analisa Visualisasi Dengan Variasi Posisi Ketinggian Outlet

Kondisi sistem distribusi udara pada ruang server menunjukkan aliran distribusi udara melalui *diffuser* dengan variasi kecepatan udara 2 m/s, 2,5 m/s dan 3 m/s. Posisi *diffuser* terletak pada plafon dengan ketinggian 3 m dari permukaan lantai dan menghembuskan udara pendingin sebesar 15°C. Untuk mendapatkan distribusi udara yang tepat pada daerah yang diamati (server), maka posisi *inlet* udara sangat berpengaruh.



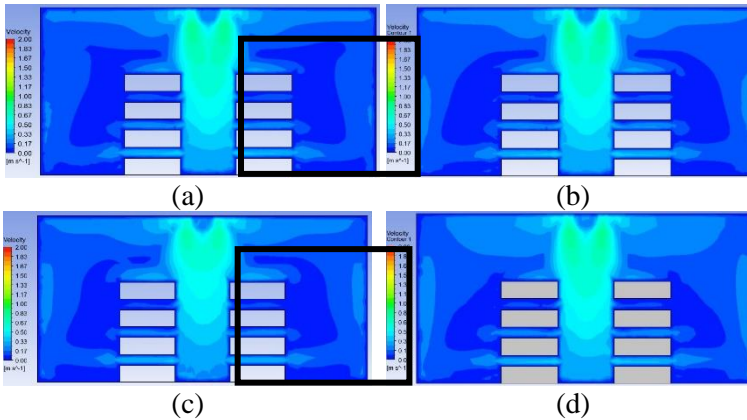
Gambar 4.4 Pathline Aliran udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

Dapat dilihat pada gambar 4.4 bahwa pada saat aliran udara dingin melintasi rak server, kecepatan aliran udara dingin

mengalami penurunan dan persebaran dari berbagai variasi posisi ketinggian *outlet*. Dalam simulasi ini, *diffuser* akan menyebarkan hembusan udara dingin ke dalam ruang server dengan kecepatan 2 m/s secara vertikal dari atas ke bawah. Aliran udara dingin akan berbelok melalui celah-celah rak server lalu akan terpecah saat menabrak lantai dan akan melintasi tiap sisi ruang server. Aliran udara dingin yang berbelok melewati celah rak server diakibatkan karena adanya *outlet* yang berada di belakang server. Terlihat pada gambar 4.4, aliran udara dingin pada server 2 berbelok melalui celah antar rak server, lalu langsung mengarah ke *outlet* yang berada tepat di belakang server 2. Berbeda dengan aliran pada server 1, sebagian udara dingin berbelok melalui celah antar rak, tetapi sebagian lagi berbelok pada saat menyentuh permukaan lantai dan aliran udara berbelok ke sisi kosong sebelah kiri server 1 dan mengalir keatas. Demikian udara dingin mengalir seterusnya, sehingga udara dingin akan tersebar ke dalam ruangan. Jika kita melihat pada posisi ketinggian *outlet* 3 m (plafon), sistem distribusi udara ini adalah sistem distribusi pendinginan dengan *locally ducted supply and locally ducted return*, dimana pada sistem distribusi seperti ini, udara panas keluaran dan udara kondisi terpisah. Sehingga sirkulasi *supply* udara dingin dan udara *return* sangat baik.

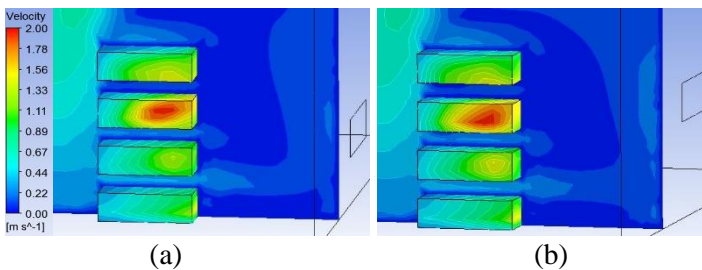
4.1.1. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 1

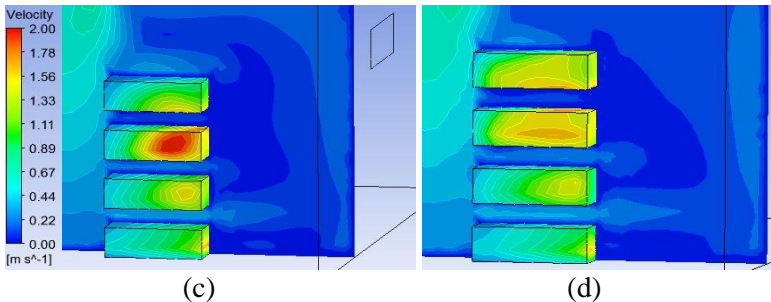
Pada pembahasan sub bab ini, hal yang akan dianalisa adalah karakteristik aliran udara pendingin melalui *diffuser* pada kecepatan udara 2 m/s. Analisa yang akan digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran yang mengalir dalam simulasi diperoleh dari kontur kecepatan udara pada daerah server. Kontur tersebut akan digunakan sebagai visualisasi distribusi kecepatan udara yang mengalir melalui daerah server 1.



Gambar 4.5 Kontur kecepatan udara pada server 1; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5m; (b) 1m; (c) 1,8m; (d) 3m

Gambar 4.5 menunjukkan aliran distribusi udara dingin pada server 1 dengan kecepatan udara *inlet* sebesar 2 m/s. Gambar ini menunjukkan kontur kecepatan udara variasi posisi ketinggian *outlet* yang terbentuk pada bidang $z/w = -1,9$. Dari visualisasi tersebut dapat dilihat bahwa udara dingin memasuki ruangan melalui *top inlet* kemudian udara menyebar secara vertikal ke bawah ke arah lantai. Udara yang disemburkan dari atas tersebut akan berbelok dan melewati rak-rak server 1 sebelum keluar melalui *outlet* yang berada di sebelah kanan dan kiri.



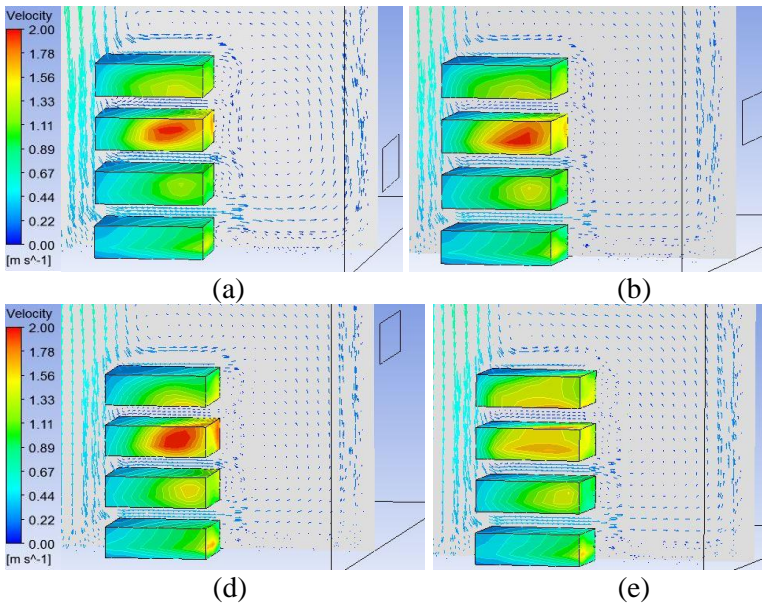


Gambar 4.6 Kontur kecepatan udara pada server 1; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

Gambar 4.6 merupakan *zoom in* distribusi kecepatan dari server 1. Dari hasil tampilan kontur kecepatan diperoleh bahwa distribusi kontur kecepatan pada variasi posisi ketinggian *outlet*. Kecepatan udara pada *inlet diffuser* tidak sebesar 2 m/s , hal ini diakibatkan adanya perbedaan temperatur udara ruangan dengan *inlet diffuser*. Setelah udara keluar dari *diffuser*, terlihat bahwa udara memiliki kecepatan yang semakin turun. Melalui kontur kecepatan, terlihat bahwa kecepatan udara dingin pada ketinggian server menurun. Kecepatan udara pada tiap baris rak server berada pada rentang $0,22 - 0,89 \text{ m/s}$ di semua variasi ketinggian *outlet*. Kemudian udara dingin mulai jatuh ke bawah lalu menyebar, sehingga udara panas yang dihasilkan ketika melewati rak server naik keatas. Hal ini disebabkan pergerakan udara panas yang dihasilkan oleh server, dimana udara panas memiliki *density* yang rendah. Melalui kontur kecepatan udara dapat dilihat pula kecepatan udara disekitar ruang pada rentang $0 - 0,44 \text{ m/s}$, hal ini menunjukkan adanya sirkulasi aliran yang terbentuk akibat efek *buoyancy* udara pendingin dan udara panas di dalam ruangan.

Dari hasil tampilan kontur kecepatan juga diperoleh bahwa distribusi kontur kecepatan pada variasi posisi ketinggian *outlet* tidak jauh berbeda. Ini terlihat dari warna aliran yang melewati celah-celah server 1. Kecepatan aliran paling tinggi berada di antara rak server 3 dan rak server 4 yang didapat pada seluruh variasi ketinggian posisi *outlet*. Dapat terlihat dari warna biru muda

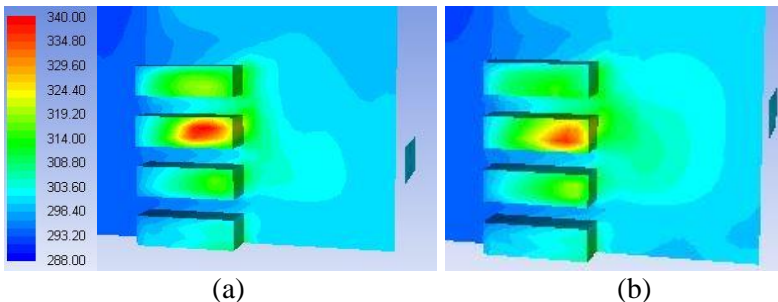
yang menunjukkan kecepatan aliran udara dingin berkisar antara 0,22-0,67 m/s. Hal ini disebabkan karena kecepatan udara pendingin yang disebarkan dari *top inlet* langsung mengarah ke bawah, dimana rak server 4 berada pada posisi paling bawah dekat dengan lantai, sehingga sebagian besar aliran udara melewati celah antara rak server 3 dan rak server 4. Sedangkan distribusi kecepatan paling rendah berada di antara rak server 1 dan rak server 2. Ini terlihat dari warna kontur biru yang menunjukkan kecepatan aliran sebesar 0-0,44. Hal ini disebabkan udara kondisi yang disebarkan dari atas secara vertikal memiliki kecepatan yang masih tinggi di sekitar rak server 1 dan rak server 2, sehingga hanya sedikit udara dingin yang melewati celah rak server 1 dan rak server 2.

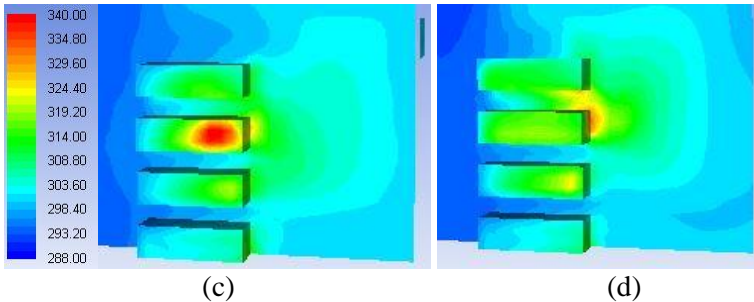


Gambar 4.7 Vektor kecepatan udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

Pada Gambar 4.7 menunjukkan vektor kecepatan udara dari *inlet diffuser*, dimana hembusan aliran udara dari *inlet diffuser* turun akibat gaya tekan *diffuser* dan gaya gravitasi. Hal ini dapat terlihat secara visual dari vektor kecepatan udara yang dihasilkan di daerah *inlet diffuser*. Jangkauan aliran udara dengan kecepatan udara stabil terlihat hingga jarak 1,2 m dari *inlet diffuser* atau pada ketinggian server 1. Pada jarak ini, kecepatan udara menurun hingga 1,11 m/s.

Dari hasil tampilan kontur kecepatan diperoleh bahwa distribusi kontur kecepatan paling tinggi berada pada celah antara rak server 3 dan rak server 4 dan distribusi kontur kecepatan paling rendah berada pada celah antara rak server 1 dan rak server 2. Analisa tersebut juga sesuai jika di lihat dari vektor kecepatan. Pada gambar 4.7, terlihat visualisasi dari vektor kecepatan berbagai variasi posisi ketinggian *outlet*. Panjang garis vektor berbanding lurus dengan kecepatan, semakin panjang garis vektor, maka kecepatannya semakin tinggi. Vektor pada celah antara rak 3 dan 4 memiliki ukuran garis yang lebih panjang daripada celah rak lainnya. Ini menandakan pada celah antara rak 3 dan 4 memiliki kecepatan aliran udara dingin yang lebih tinggi daripada celah lainnya.





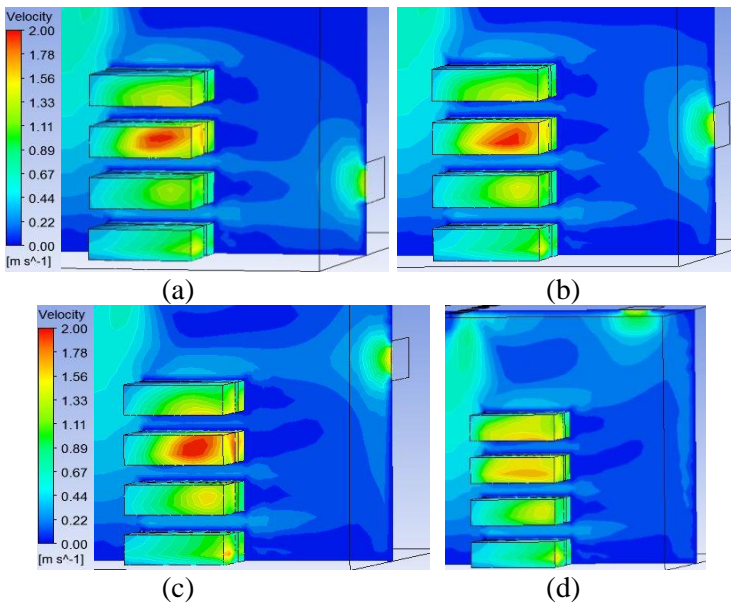
Gambar 4.8 Kontur temperatur udara pada server 1 ; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

Pada Gambar 4.8 menampilkan kontur temperatur udara pada server 1, dari rak 1 sampai rak 4. Terlihat kontur temperatur udara pada variasi ketinggian *outlet* cukup bervariasi. Hal ini terlihat dari warna kontur. Pada rak server 2 dari berbagai variasi ketinggian *outlet*, temperatur udara sekitarnya cukup tinggi dibandingkan dengan rak lainnya. Ini jelas terlihat dari warna hijau-kuning yang berada di sekitar rak server 2 dan warna merah pada permukaan kiri rak server 2. Warna hijau-kuning berkisar antara 314-324 K (41-51°C) dan warna merah antara 329-340 K (56-67°C). Hal ini disebabkan distribusi aliran udara dingin pada rak server 2 sangat kurang dari berbagai posisi ketinggian *outlet*. Akibatnya, temperatur rak paling panas berada pada posisi ketinggian *outlet* 1,8 m. Dari pembahasan sebelumnya, kontur kecepatan dan vektor kecepatan, di dapat aliran udara yang melalui rak server 2 memang paling rendah dari rak server lainnya.

4.1.2. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 2

Gambar 4.9 menunjukkan aliran distribusi udara pada server 2 dengan kecepatan udara *inlet* sebesar 2 m/s. Gambar ini menunjukkan kontur kecepatan udara variasi posisi ketinggian *outlet* yang terbentuk pada bidang $z/w = -2,9$. Dari visualisasi tersebut terdapat perbedaan dari server 1, yaitu letak posisi *outlet* yang tepat berada di belakang server 2. Hal ini menyebabkan sirkulasi udara dingin pada daerah server 2 lebih baik dari pada

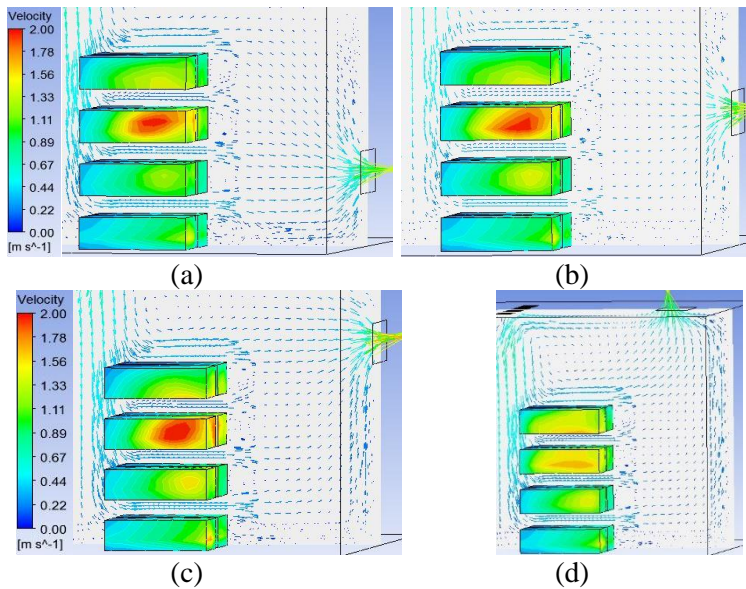
server 1. Setelah udara dingin keluar dari *diffuser*, udara dingin turun secara vertikal ke bawah. Lalu udara dingin melewati rak server 2 dan langsung mengarah ke *outlet* yang berada tepat di belakang server 2. Udara dingin yang melewati rak server akan naik temperaturnya menjadi udara panas. Pergerakan udara panas yang dihasilkan oleh server 2 akan langsung mengarah ke *outlet* dimana udara panas memiliki *density* yang lebih rendah. Melalui kontur kecepatan udara dapat dilihat pula kecepatan udara disekitar ruang pada rentang 0,22 – 0,44 m/s, hal ini menunjukkan adanya sirkulasi aliran yang terbentuk akibat efek *buoyancy* udara pendingin dan udara panas di dalam ruangan.



Gambar 4.9 Kontur kecepatan udara pada server 2 ; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

Dari gambar 4.9 juga cukup terlihat jelas perbedaan dari variasi *outlet*. Ada 4 aliran udara dingin yang terbentuk yang masing-masing berada diatas rak server. Pada posisi ketinggian

outlet 0,5 m, terlihat bahwa aliran udara di atas rak 7 dan rak 8 lebih tinggi dari pada aliran udara di atas rak 5 dan 6. Ini terlihat dari warna kontur yang konstan sepanjang aliran menuju *outlet*, sekitar 0,22-0,67 m/s. Pada posisi ketinggian *outlet* 1 m, aliran udara di atas rak 5, rak 7 dan rak 8 hampir sama, sedangkan aliran udara di atas rak 6 paling rendah, sekitar 0,22-0,44 m/s. Pada posisi ketinggian *outlet* 1,8 m, aliran udara di atas rak 5 dan aliran udara di atas rak 8 lebih tinggi dari pada aliran udara di atas rak 6 dan rak 7. Sedangkan pada posisi ketinggian *outlet* 3 m, aliran udara di atas rak 5 yang konstan sepanjang menuju *outlet*, karena *outlet* berada di atas.

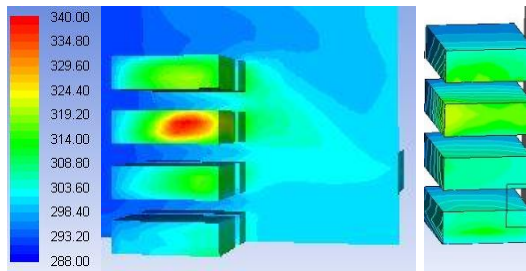


Gambar 4.10 Vektor kecepatan udara pada server 2 ; $v = 2 \text{ m/s}$
Posisi ketinggian outlet : (a) 0,5 m ; (b) 1 m ; (c) 1,8 m ; (d) 3 m

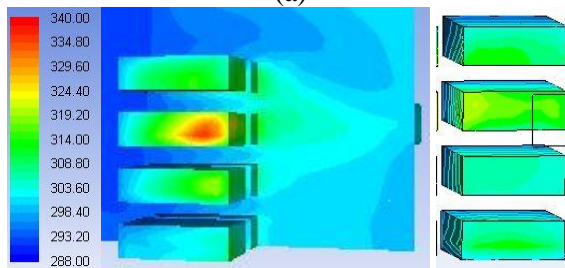
Pada Gambar 4.10 menunjukkan vektor kecepatan udara dari *inlet diffuser*, dimana hembusan aliran udara dari *inlet diffuser* turun akibat gaya tekan *diffuser* dan gaya gravitasi. Hal ini dapat

terlihat secara visual dari vektor kecepatan udara yang dihasilkan di daerah *inlet diffuser*. Terlihat dari distribusi vektor kecepatan pada server 2, arah vektor mengarah ke *outlet*.

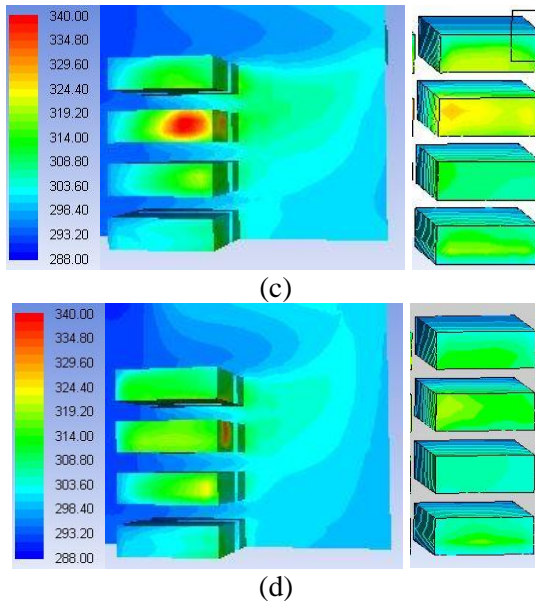
Dari hasil tampilan kontur kecepatan pada server 2 diperoleh bahwa distribusi kontur kecepatan paling tinggi berada pada aliran udara yang melewati rak 5, rak 7 dan rak 8, sedangkan aliran udara yang melewati rak 6 paling rendah. Analisa tersebut juga sesuai jika di lihat dari vektor kecepatan. Pada gambar 4.10, terlihat visualisasi dari vektor kecepatan berbagai variasi posisi ketinggian *outlet*. Panjang garis vektor berbanding lurus dengan kecepatan, semakin panjang garis vektor, maka kecepatannya semakin tinggi. Vektor pada celah antara rak 3 dan 4 memiliki ukuran garis yang lebih panjang daripada celah rak lainnya. Ini menandakan pada celah antara rak 3 dan 4 memiliki kecepatan aliran udara dingin yang lebih tinggi daripada celah lainnya.



(a)



(b)



Gambar 4.11 Kontur temperatur di sekitar server 2 ; $v = 2 \text{ m/s}$
 (a) Posisi ketinggian outlet: (a) 0,5m ; (b) 1m ; (c) 1,8m ; (d) 3m

Pada Gambar 4.11 menampilkan kontur temperatur udara pada server 2, dari rak 5 sampai rak 8. Posisi server 2, rak 5 sampai rak 8, tidak memungkinkan terlihat karena terhalangi oleh server 1 yang berada di depan server 2. Oleh karena itu, pada server 2 dilakukan *zoom in* dari arah belakang server 2 untuk mengetahui kontur temperatur permukaan tiap rak server yang berada pada server 2.

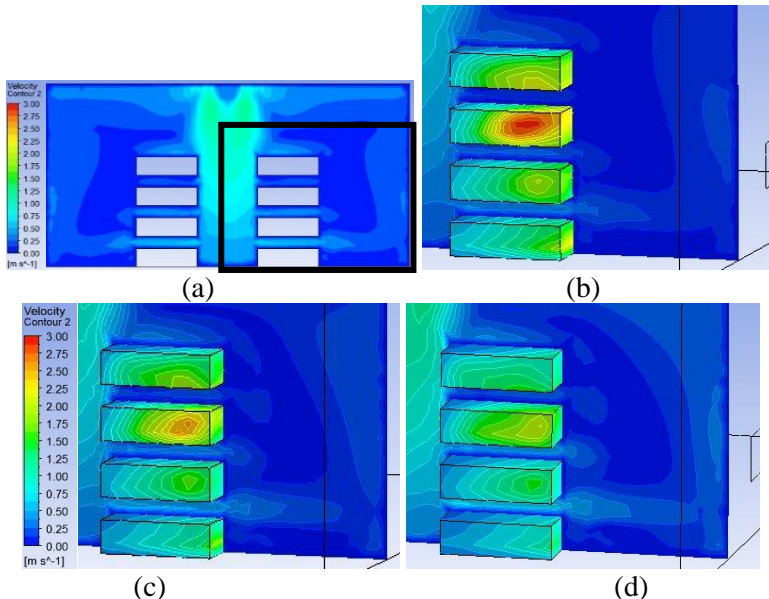
Terlihat kontur temperatur udara pada variasi ketinggian *outlet* cukup bervariasi. Hal ini terlihat dari warna kontur. Pada rak server 2, dari berbagai variasi ketinggian *outlet*, temperatur udara sekitarnya lebih rendah dibandingkan dengan rak server yang berada pada server 1. Ini jelas terlihat dari warna hijau yang berada di sekitar server 2 dan warna hijau-kuning pada permukaan server 2. Warna hijau berkisar antara 308-314 K (35-41°C) dan warna hijau-kuning antara 308-324 K (35-51°C). Hal ini disebabkan

distribusi aliran udara dingin pada server 2 lebih baik dari pada server 1, dimana posisi *outlet* berada tepat di belakang server 2. Sedangkan untuk posisi ketinggian outlet, temperatur rak server 6 lebih tinggi dibanding rak server lainnya yang berada pada server 2. Ini terlihat dari warna kuning yang lebih dominan, yaitu sekitar 319-324 K.

4.2. Analisa Visualisasi Dengan Variasi Kecepatan

4.2.1. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 1

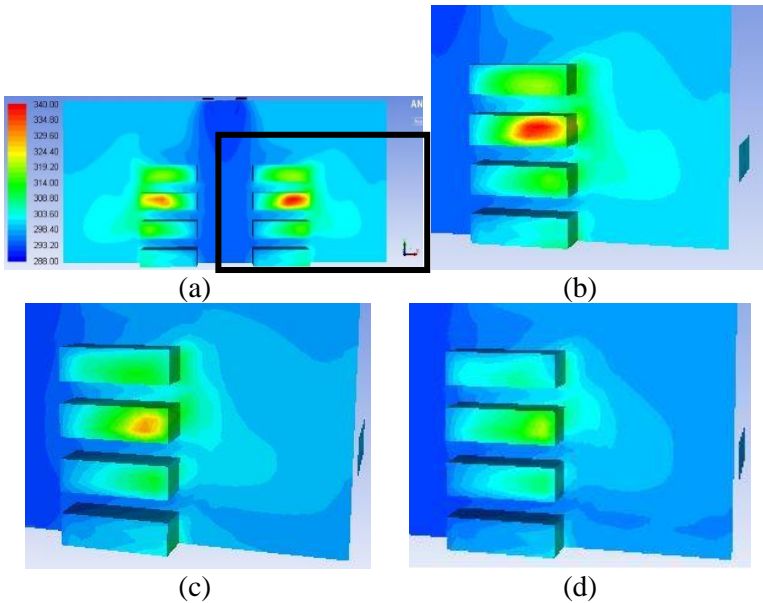
Pada sub bab ini hal yang akan dianalisa adalah karakteristik aliran variasi kecepatan udara pendingin, yakni 2 m/s ; 2,5 m/s; 3 m/s. Dari gambar kontur kecepatan udara, distribusi warna mewakili masing-masing rentang kecepatan udara aliran tertentu. Gambar dari kontur kecepatan udara yang diperoleh seperti di bawah ini:



Gambar 4.12 Kontur kecepatan udara pada server 1; posisi ketinggian outlet 0,5 m (a) posisi ketinggian outlet 0,5 m (b) $v = 2 \text{ m/s}$ (c) $v = 2.5 \text{ m/s}$ (d) $v = 3 \text{ m/s}$

Gambar 4.12 menunjukkan distribusi kecepatan udara yang terjadi pada posisi ketinggian outlet 0,5 m dengan variasi kecepatan *inlet*. Dapat dilihat dari distribusi warna yang terjadi bahwa variasi kecepatan udara tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada kecepatan udara aliran di dalam ruang server.

Sedangkan melalui kontur distribusi temperatur udara, dapat dilihat visualisasi udara pendingin yang ditunjukkan oleh warna biru laut pada gambar 4.13. Semakin tinggi kecepatan udara masuk, temperatur udara ruangan semakin dingin. Terlihat melalui gambar, udara pendingin memenuhi ruangan.

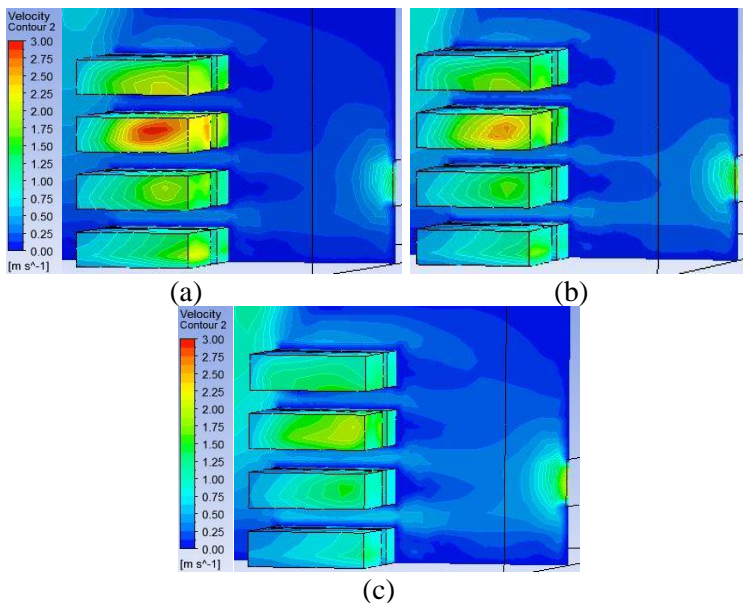


Gambar 4.13 Kontur temperatur udara pada server 1; posisi ketinggian outlet 0,5m (a) posisi ketinggian outlet 0,5 m (b) $v = 2 \text{ m/s}$ (b) $v = 2.5 \text{ m/s}$ (c) $v = 3 \text{ m/s}$

Jika di lihat pada temperatur permukaan pada server 1, variasi kecepatan *inlet* sangat signifikan. Ini terlihat dari warna kontur permukaan pada rak server 2. Pada kecepatan *inlet* 2 m/s,

permukaan rak server 2 berwarna merah, seiring dengan naiknya kecepatan *inlet*, warna merah tersebut hilang. Terbukti pada kecepatan *inlet* 3 m/s, permukaan rak server 2 berwarna biru, hijau dan sedikit kuning, ini menandakan pengaruh kecepatan *inlet* cukup signifikan, dimana semakin tinggi kecepatan, maka temperatur permukaan server semakin rendah, begitu juga pada ruang server.

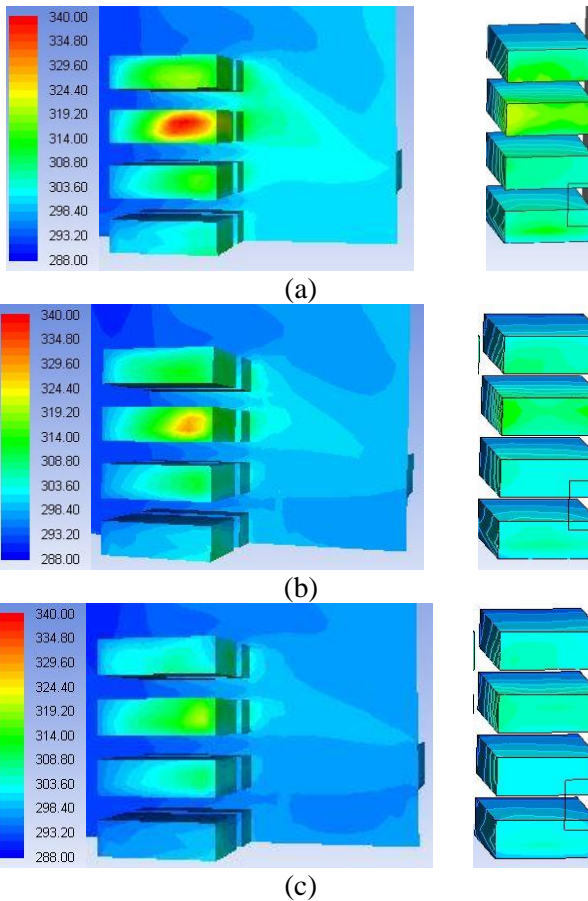
4.2.2. Pola Aliran Kecepatan dan Temperatur Pada Server 2



Gambar 4.14 Kontur kecepatan udara pada server 2; posisi ketinggian outlet 0,5 m (a) $v = 2 \text{ m/s}$ (b) $v = 2.5 \text{ m/s}$ (c) $v = 3 \text{ m/s}$

Gambar 4.14 menunjukkan distribusi kecepatan udara pada server 2 yang terjadi pada posisi ketinggian outlet 0,5 m dengan variasi kecepatan *inlet*. Dapat dilihat dari distribusi warna yang terjadi bahwa variasi kecepatan udara cukup memberikan perbedaan pada kecepatan udara aliran di dalam ruang server.

Terlihat pada saat kecepatan *inlet* 2 m/s, warna aliran udara menuju outlet biru laut, sedangkan pada kecepatan inlet 3 m/s, warna aliran udara menuju outlet menjadi biru muda. Perbedaan warna ini menandakan kecepatan aliran udara. Warna biru berkisar antara 0-0,5 m/s, sedangkan biru laut sekitar 0,5-1 m/s. Perbedaan kecepatan ini akan berdampak pada distribusi temperatur.



Gambar 4.15 Kontur temperatur udara pada server 2; posisi ketinggian outlet 0,5m (a) $v = 2$ m/s (b) $v = 2.5$ m/s (c) $v = 3$ m/s

Pada Gambar 4.15 menampilkan kontur temperatur udara pada server 2, dari rak 5 sampai rak 8 dengan variasi kecepatan *inlet*. Posisi server 2, rak 5 sampai rak 8, tidak memungkinkan terlihat karena terhalangi oleh server 1 yang berada di depan server 2. Oleh karena itu, pada server 2 dilakukan *zoom in* dari arah belakang server 2 untuk mengetahui kontur temperatur permukaan tiap rak server yang berada pada server 2.

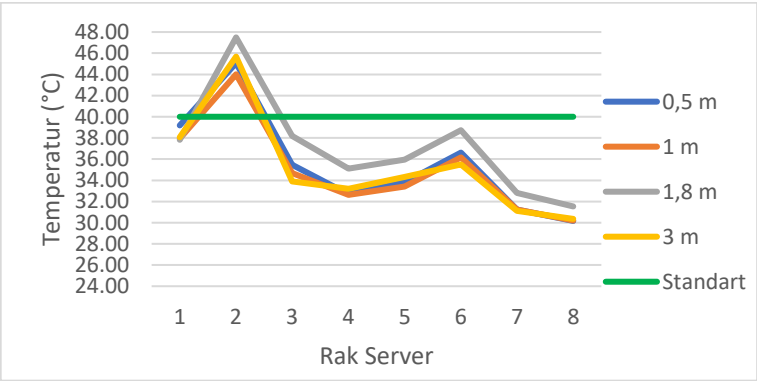
Terlihat kontur temperatur udara pada variasi kecepatan *inlet* sangat signifikan. Hal ini terlihat dari warna kontur udara. Pada kecepatan *inlet* 2 m/s, bagian belakang rak server 5 dan rak server 6 berwarna hijau, sekitar 314 K dan ruang server berwarna biru cerah, sekitar 303 K. Seiring naiknya kecepatan *inlet*, warna hijau pada bagian belakang rak server 5 dan 6 berubah menjadi warna biru cerah, sekitar 303 K dan ruang server didominasi warna biru, sekitar 296 K.

4.3. Analisa Grafik Temperatur Belakang Rak Server Dengan Variasi Posisi Ketinggian Outlet

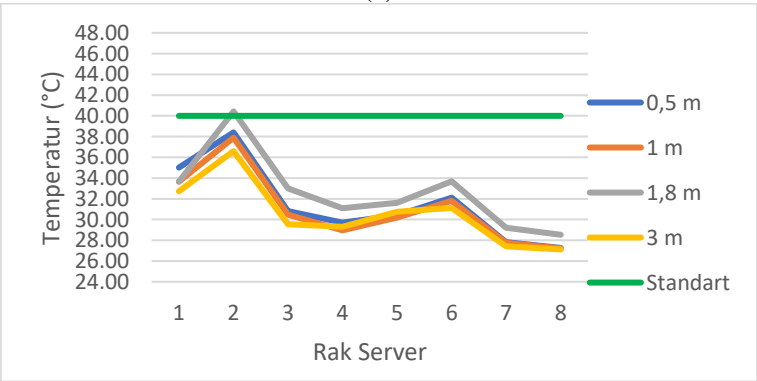
Pada sub bab ini yang akan dibahas adalah pengambilan data temperatur permukaan rak server 1-8. Mengacu pada *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* ASHRAE dan studi literatur, rekomendasi temperatur kerja yang baik pada rak server adalah di bawah 45°C. Tetapi, sebagian besar perusahaan yang memiliki ruang server, mengendalikan temperatur rak server di bawah 40°C, karena rekomendasi dari ASHRAE untuk temperatur rak server 45°C terlalu panas. Oleh karena itu, penggunaan sensor yang diletakkan di rak server menjadi sebuah solusi untuk mengendalikan temperatur. Peletakan sensor suhu itu sendiri berada pada posisi belakang dari tiap-tiap rak server. Posisi belakang rak server adalah posisi dari keluaran udara panas yang melewati server dimana posisi belakang rak server behadapan langsung dengan daerah *hot aisle*. Hal ini yang menyebabkan data temperatur yang di ambil adalah temperatur permukaan belakang dari tiap rak server. (Gambar 4.16)



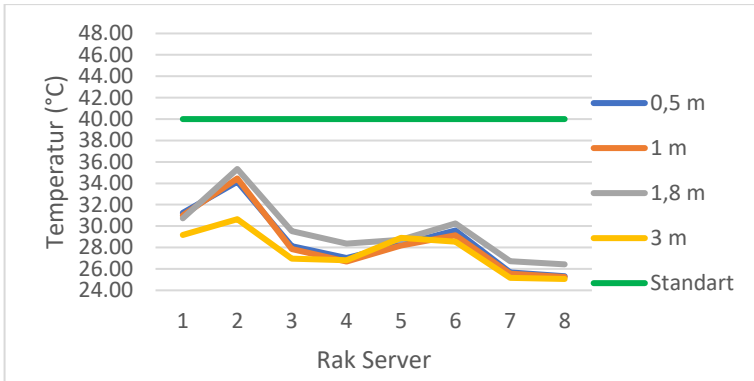
Gambar 4.16 Permukaan belakang rak server



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.17 Grafik temperatur belakang rak server(a) $V = 2 \text{ m/s}$ (b) $V = 2,5 \text{ m/s}$ (c) 3 m/s

Gambar 4.17 merupakan grafik temperatur belakang rak server dari variasi posisi ketinggian *outlet* dan variasi kecepatan *inlet*. Pada gambar 4.17 (a), besar kecepatan *inlet* sebesar 2 m/s . Didapatkan bahwa temperatur tidak aman berada pada rak server 2 di semua posisi ketinggian *outlet*. Ini menandakan bahwa pada variasi kecepatan *inlet* 2 m/s , tidak aman karena temperatur belakang pada rak server 2 melampaui temperatur *setting-an*, yaitu 40°C .

Pada bagian (b), yaitu kecepatan inlet $2,5 \text{ m/s}$, temperatur kritis berada pada rak server 2 pada posisi ketinggian *outlet* $1,8 \text{ m}$. Hal ini menarik, melihat temperatur rak server 2 pada posisi ketinggian *outlet* $0,5 \text{ m}$, 1 m dan 3 m , aman di bawah temperatur *setting-an*. Pada bagian ini akan dilakukan kajian lebih lanjut berupa analisa perpindahan panas yang terjadi pada rak server 2 pada ketinggian *outlet* $1,8 \text{ m}$. Sedangkan pada bagian (c), kecepatan inlet 3 m/s , terlihat semua temperatur rak aman di berbagai variasi posisi ketinggian *outlet*. Hal ini terjadi karena semakin besar kecepatan *inlet*, maka distribusi temperatur akan lebih rendah.

Tabel 4.1 Matriks perbandingan posisi ketinggian outlet dan variasi kecepatan inlet terhadap rak server

Kecepatan Inlet	ketinggian Outlet	Rak Server							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2 m/s	0,5 m	Aman	Tidak Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1 m	Aman	Tidak Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1,8 m	Aman	Tidak Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	3 m	Aman	Tidak Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
2,5 m/s	0,5 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1,8 m	Aman	Tidak Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	3 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
3 m/s	0,5 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	1,8 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
	3 m	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman

Dari matriks tabel 4.1 didapatkan perbandingan antara variasi posisi ketinggian *outlet* dan kecepatan *inlet* terhadap rak server. Keterangan aman menandakan bahwa rak server tersebut memiliki temperatur di bawah 40°C, sedangkan keterangan tidak aman dengan tulisan warna merah adalah indikasi bahwa rak server memiliki temperatur di atas temperatur *setting-an*, yaitu di atas 40°C.

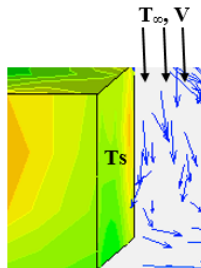
Dari tabel ini di dapat bahwa pada kecepatan *inlet* 2 m/s, semua rak server 2 berada pada posisi tidak aman di berbagai ketinggian *outlet*, sedangkan rak server lainnya aman. Pada kecepatan *inlet* 2,5 m/s, di dapat rak server 2 yang tidak aman pada posisi ketinggian *outlet* 1,8 m, sedangkan posisi ketinggian *outlet*

lainnya aman. Pada kecepatan *inlet* 3 m/s, rak server untuk semua variasi aman.

4.4. Karakteristik Perpindahan Panas

4.4.1. Contoh Perhitungan

Analisa dilakukan dengan memvariasikan posisi ketinggian *outlet* 0,5m; 1m; 1,8m; 3m dan kecepatan udara, yaitu 2 m/s; 2,5m/s; 3 m/s. Data dari hasil simulasi dan perhitungan yang akan ditampilkan adalah data pada posisi ketinggian *outlet* 1,8 m dengan kecepatan inlet 2,5 m/s pada rak 1, rak 2 dan rak 3. Data tersebut di pilih karena pada kecepatan 2,5 m/s dan posisi ketinggian outlet 1,8 m merupakan data yang *critical* pada rak 2, sedangkan pada rak 1 dan rak 3 tidak *critical*. Data akan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel hasil perhitungan. Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil simulasi akan digunakan untuk menganalisa pengaruh posisi ketinggian *outlet* terhadap distribusi temperatur udara dan perpindahan panas. Perhitungan perpindahan panas dilakukan dengan asumsi plat datar satu dimensi. Berikut adalah contoh perhitungan pengaruh posisi ketinggian *outlet* 1,8 m pada kecepatan udara 2,5 m/s di rak server 2.



Gambar 4.18 Detail rak server 2

Data dari simulasi:

$$T_{\infty} = 310,58 \text{ K}$$

$$V = 0,521 \text{ m/s}$$

$$T_s = 313,427 \text{ K}$$

$$L = 0,3 \text{ m}$$

Properties dari Tabel A.4 :

$$T_f = 312,00 \text{ K}$$

$$\beta = 0,003205 \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 1.10539 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0.00001696 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C_p = 1,00724 \text{ kJ/kg.K}$$

$$k = 0,02726 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0,70596$$

1. Mencari *Grasshof Number*

Rumus yang digunakan untuk mencari nilai dari *Grasshof Number* menggunakan pendekatan rumus pada konveksi plat datar.

$$Gr_L \equiv \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

$$Gr_L \equiv \frac{9,81 \text{ m/s}^2 0,003205 \text{ K}^{-1} (313,427 \text{ K} - 310,58 \text{ K}) (0,3 \text{ m})^3}{(0,00001696 \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$Gr_L = 8403605,199$$

2. Mencari nilai *Rayleigh Number*

Dengan didapatkan nilai *Grasshof Number*, maka nilai *Rayleigh Number* dapat diperoleh melalui rumus :

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha}$$

$$Ra_L = 8403605,199 \times 0,70596$$

$$Ra_L = 5,9 \times 10^6$$

3. Mencari nilai *Nusselt Number*

Dengan menggunakan analisa perpindahan panas, setelah didapatkan nilai Ra dan Nu, maka nilai koefisien konveksi didapat melalui rumus:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 (5,9 \times 10^6)^{1/4}}{[1 + (0,492/0,70596)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$\overline{Nu}_L = 26,023$$

4. Mencari nilai koefisien konveksi h

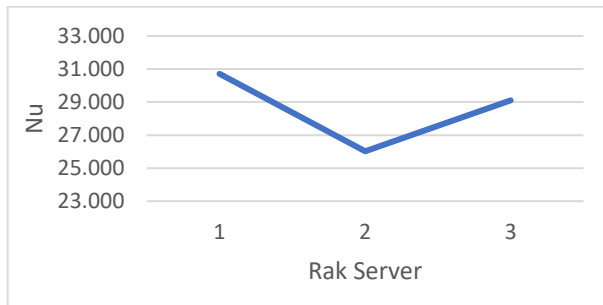
$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} L}{k}$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L}$$

$$\bar{h} = \frac{26,023 \times 0,02726 \text{ W/mK}}{0,3 \text{ m}}$$

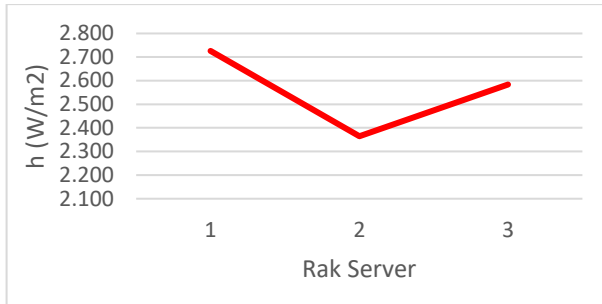
$$\bar{h} = 2,365 \text{ W/m}^2\text{.K}$$

4.4.2. Analisa Perpindahan Panas



Gambar 4.19 Perbandingan Nusselt Number pada posisi ketinggian outlet 1,8 m; $V = 2,5 \text{ m/s}$

Pada gambar 4.19 menunjukkan perbandingan Nusselt Number terhadap rak server. Pada *natural convection*, nilai *Nusselt Number* berhubungan dengan *Rayleigh Number*. Semakin tinggi nilai *Rayleigh* yang didapatkan, maka semakin besar efek *buoyancy* pada fluida. Efek *buoyancy* dipengaruhi oleh perbedaan temperatur permukaan benda dengan fluida yang mengalir. Semakin besar perbedaan antara temperatur permukaan benda dengan temperatur fluida, maka efek *buoyancy* nya semakin besar. Meningkatnya *Rayleigh Number* akan membuat nilai *Nusselt Number* juga meningkat. Jika dibandingkan pada tiap rak server 1-3, rak server 1 memiliki efek *buoyancy* paling tinggi, lalu rak server 3 dan yang paling rendah rak server 2.



Gambar 4.20 Perbandingan koefisien konveksi pada posisi ketinggian outlet 1,8 m; $V = 2,5$ m/s

Hubungan *Nusselt Number* dengan koefisien konveksi adalah berbanding lurus. Sama seperti pada *Nusselt Number*, pada koefisien konveksi paling besar berada pada rak server 1. Pada keadaan ini, nilai koefisien konveksi adalah sebesar $2,726 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Kemudian koefisien konveksi mengalami penurunan seiring dengan penurunan *Nusselt Number*. Pada rak server 2, nilai koefisien konveksi menurun, sebesar $2,365 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Sedangkan pada rak server 3 meningkat kembali dengan nilai koefisien konveksi sebesar $2,583 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Dengan bertambahnya *Nusselt Number*, maka nilai dari h juga semakin besar.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi numerik yang dilakukan terhadap ruang server dengan variasi posisi ketinggian *outlet* 0,5m; 1m; 1,8m; 3m dan kecepatan *inlet*, 2 m/s ; 2,5 m/s ; 3 m/s, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Rak server 2 merupakan rak dengan temperatur paling tinggi di semua variasi posisi ketinggian *outlet* dan kecepatan *inlet*.
2. Pada variasi posisi ketinggian *outlet*, ketinggian $y = 1,8$ m merupakan posisi *outlet* yang memiliki temperatur rak paling tinggi di semua variasi kecepatan *inlet*.
3. Pada variasi kecepatan *inlet* $V = 2$ m/s tidak direkomendasikan karena pada kecepatan tersebut rak server 2 berada pada posisi tidak aman di semua variasi posisi ketinggian *outlet*. Sedangkan pada $V = 2,5$ m/s, hanya posisi ketinggian *outlet* 1,8 m yang tidak aman dan pada $V = 3$ m/s, semua rak server aman di semua variasi posisi ketinggian *outlet*.
4. Pada bab analisa perhitungan perpindahan panas, rak server 2 memiliki nilai koefisien konveksi lebih kecil daripada rak server 1 dan 3. Koefisien konveksi pada rak server 2 sebesar $2,365 \text{ W/m}^2\text{K}$, rak server 1 sebesar $2,726 \text{ W/m}^2\text{K}$ dan rak server 3 sebesar $2,583 \text{ W/m}^2\text{K}$.
5. Nilai *Nusselt Number* yang dihasilkan semakin meningkat terhadap *Rayleigh Number*. *Rayleigh Number* besar menandakan efek *buoyancy* juga besar. Meningkatnya *Nusselt Number*, akan membuat nilai koefisien konveksi juga meningkat.

5.2. Saran

Dari hasil simulasi numerik yang dilakukan terhadap variasi posisi ketinggian *outlet* 0,5m; 1m; 1,8m; 3m dan kecepatan *inlet* 2m/s ; 2,5m/s ; 3m/s, saran yang bisa digunakan untuk penelitian

berikutnya adalah:

1. Pada proses simulasi secara numerik, perlu dilakukan perkembangan yang lebih banyak lagi. Perkembangan dapat digunakan sebagai perbandingan dengan hasil penelitian ini seperti posisi *outlet* di bagi menjadi dua, variasi posisi *inlet diffuser*, beban pendinginan, kondisi simulasi *unsteady* dan lain-lain.
2. Berdasarkan pada kasus yang sama, menarik untuk dilakukan penelitian lebih lanjut dengan pembahasan yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASHRAE, ASHRAE Handbook: *Thermal Guidelines for Data Processing Environments Expanded Data Center*. 2011.
- [2] Liebert Hiross “Product Documentation – High Performance Air Conditioning” catalog.
- [3] Demetriou, Dustin W., 2012. "*Thermally Aware, Energy-Based Techniques for Improving Data Center Energy Efficiency*". *Mechanical and Aerospace Engineering - Dissertations*.
- [4] Cho, Jinkyun and Kim, Byungseon Sean, 2011. “*Evaluation Of Air Management System’s Thermal Performance For Superior Cooling Efficiency In High-Density Data Centers*”. South Korea.
- [5] Setyowati, Fitri, 2014. “Studi Numerik Distribusi Temperatur dan Kecepatan Udara pada Ruang Keberangkatan Terminal 2 Bandar Udara Internasional Juanda, Surabaya”. Tugas Akhir, Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.
- [6] Son H. Ho. Rosario Luis. Muhammad M. Rahman. 2008. “*Three Dimensional Analysis for Hospital Operating Room Thermal Comfort and Contaminant Removal. Applied Thermal Engineering*; vol. 29”.
- [7] Rasmussen, Neil. 2003. “*Air Distribution Architecture Options for Mission Critical Facilities*”. White Paper #55.
- [8] Incropera, Frank P. and David P. Dewitt, 2002. “*Fundamental Heat and Mass Transfer sixth Edition*”, 2002. College of Engineering.
- [9] Manurung, Patricia, 2016. “Numerical Study Of Temperature And Air Velocity Distribution On Production Unit Room Pt. Pertamina (Persero) – Production Unit Gresik Lubricant”. Tugas Akhir, Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Temperatur *surface* belakang pada rak server

Kecepatan 2 m/s								
Ketinggian Outlet	Rak							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5 m	39.18	45.07	35.46	32.69	33.81	36.63	31.23	30.17
1 m	37.95	44.01	34.67	32.62	33.42	36.18	31.23	30.20
1,8 m	37.83	47.49	38.20	35.10	35.96	38.72	32.82	31.53
3 m	38.06	45.68	33.88	33.21	34.32	35.51	31.11	30.36
Kecepatan 2,5 m/s								
Ketinggian	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5 m	35.02	38.40	30.81	29.70	30.42	32.10	27.82	27.26
1 m	33.65	37.89	30.48	28.96	30.18	31.79	27.77	27.22
1,8 m	33.64	40.43	33.02	31.08	31.62	33.69	29.21	28.53
3 m	32.74	36.60	29.54	29.29	30.74	31.11	27.43	27.12
Kecepatan 3 m/s								
Ketinggian	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5 m	31.23	34.15	28.14	27.02	28.29	29.59	25.68	25.32
1 m	30.99	34.46	27.86	26.69	28.17	29.16	25.56	25.25
1,8 m	30.73	35.34	29.53	28.36	28.72	30.25	26.71	26.43
3 m	29.17	30.65	26.96	26.80	28.89	28.54	25.16	25.06

Perhitungan perpindahan panas konveksi pada rak server 1-3

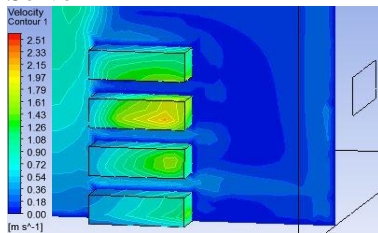
$y = 1,8 \text{ m}$; $V = 2,5 \text{ m/s}$

Rak	V	T_{∞}	T_s	ΔT	T_f	β	L	ρ	ν	k	Pr	Cp
	m/s	K	K	K	K		m	Kg/m ³	m ² /s	W/m.K		kJ/kg.K
1	0.2409	301.63	306.638	5.01	304.13	0.003288	0.30	1.14211	0.00001626	0.02663	0.70593	1.00708
2	0.1208	310.58	313.427	2.85	312.00	0.003205	0.30	1.10539	0.00001696	0.02726	0.70388	1.00724
3	0.2194	302.00	306.016	4.02	304.01	0.003289	0.30	1.14270	0.00001625	0.02662	0.70596	1.00708

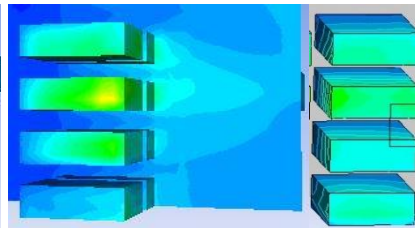
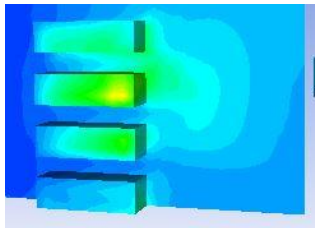
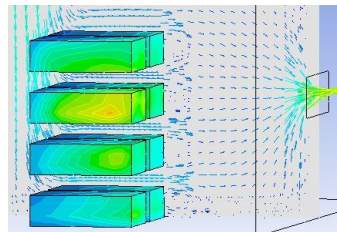
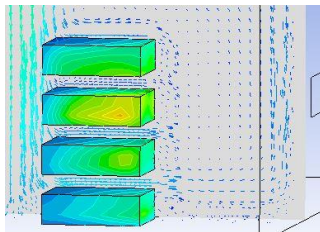
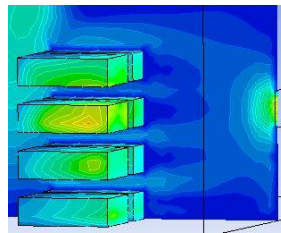
Gr	Ra	Nu	h
			W/m ² K
16499090.94388	11647124.49	30.710	2.726
8403605.19962	5915122.199	26.023	2.365
13254977.16846	9357456.628	29.111	2.583

Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 2,5 \text{ m/s}$; $y = 1 \text{ m}$

Server 1

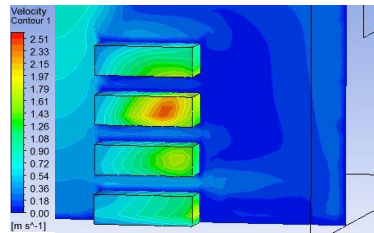


Server 2

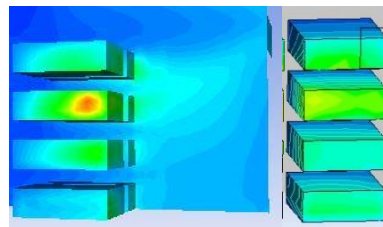
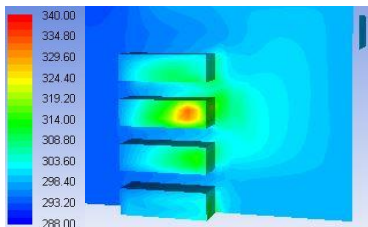
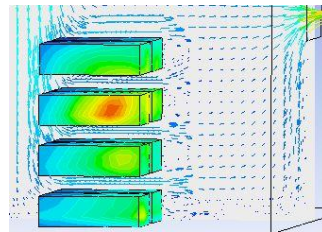
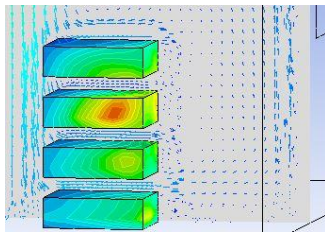
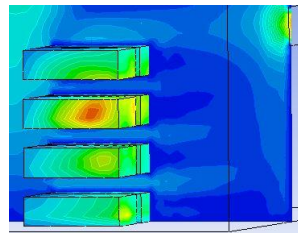


Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 2,5 \text{ m/s}$; $y = 1,8 \text{ m}$

Server 1

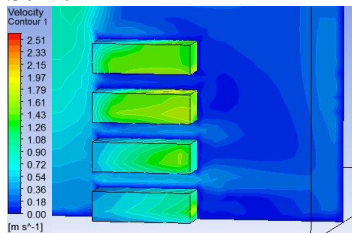


Server 2

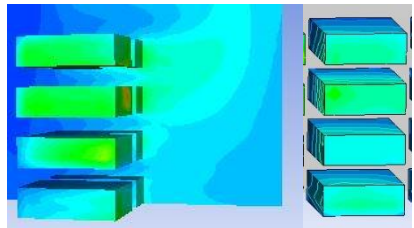
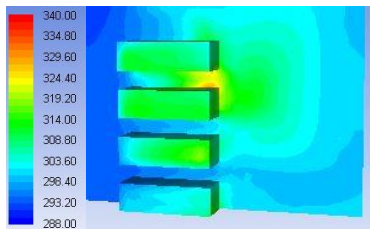
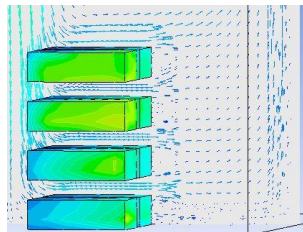
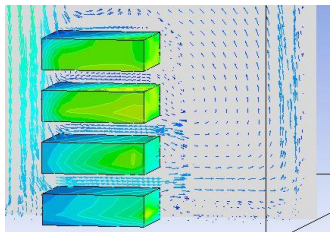
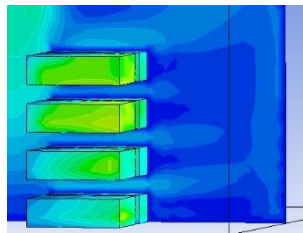


Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 2,5 \text{ m/s}$; $y = 3 \text{ m}$

Server 1

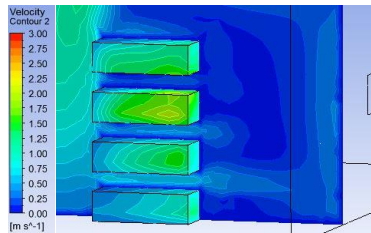


Server 2

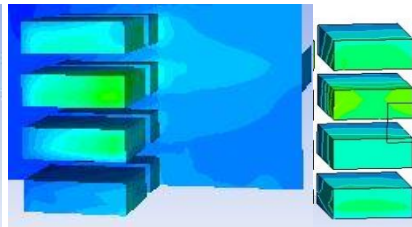
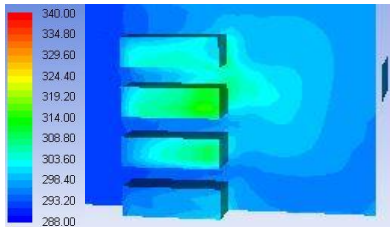
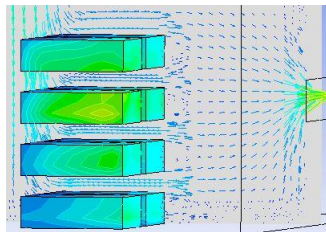
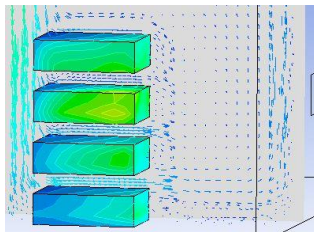
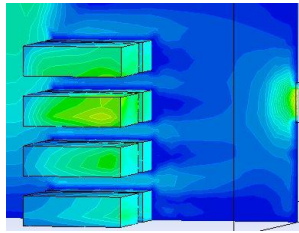


Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 3 \text{ m/s}$; $y = 1 \text{ m}$

Server 1

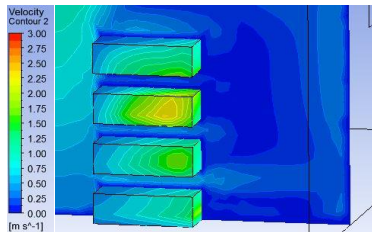


Server 2

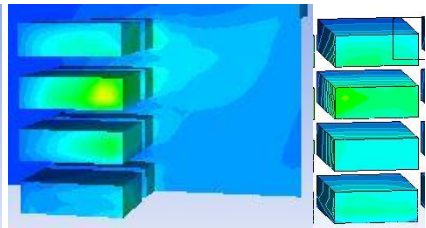
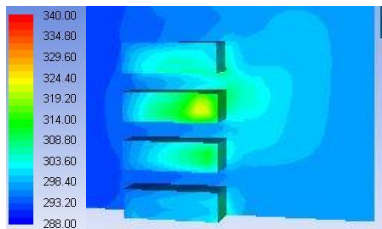
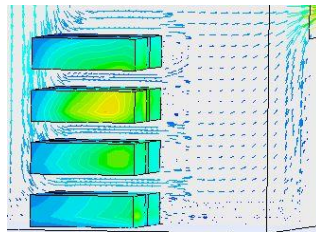
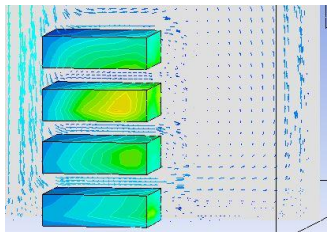
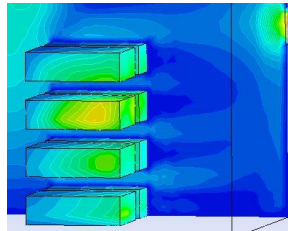


Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 3 \text{ m/s}$; $y = 1,8 \text{ m}$

Server 1

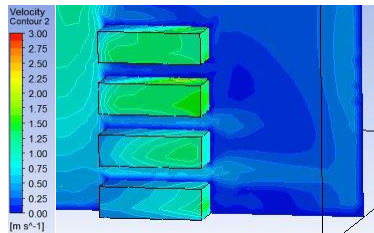


Server 2



Pola aliran kecepatan dan temperatur pada $V = 3 \text{ m/s}$; $y = 3 \text{ m}$

Server 1



Server 2

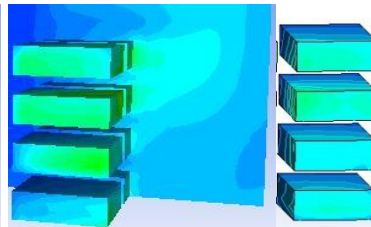
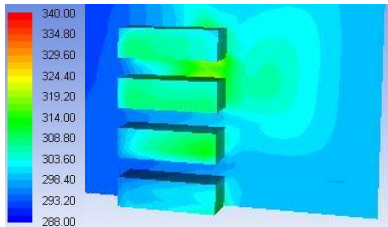
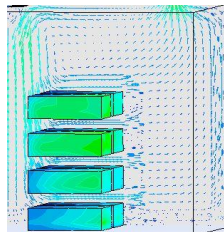
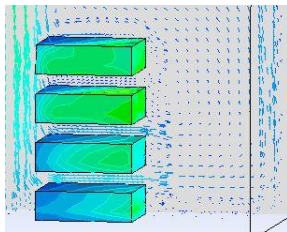
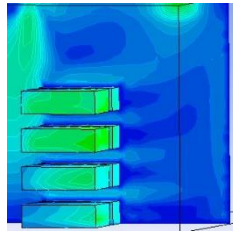


TABLE A.4 Thermophysical Properties
of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bandung, Januari 1993, merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu di TK-SD-SMP Adent 2 Bandung dan SMAN 2 Bandung (2008-2011). Setelah lulus dari SMAN 2 Bandung pada tahun 2011, Penulis melanjutkan pendidikan di D3 Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung (POLBAN). Selama menempuh studi di POLBAN, Penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Refrigerasi dan Tata Udara (HMRA) pada Departemen Minat dan Bakat (2012-2013). Penulis lulus dari POLBAN pada tahun 2014. Kemudian Penulis melanjutkan studi ke program sarjana melalui program Lintas Jalur ITS, lalu diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada Agustus 2015 dan terdaftar dengan NRP. 2115 105 016. Di Jurusan Teknik Mesin ini, Penulis mengambil Bidang Studi Konversi Energi.